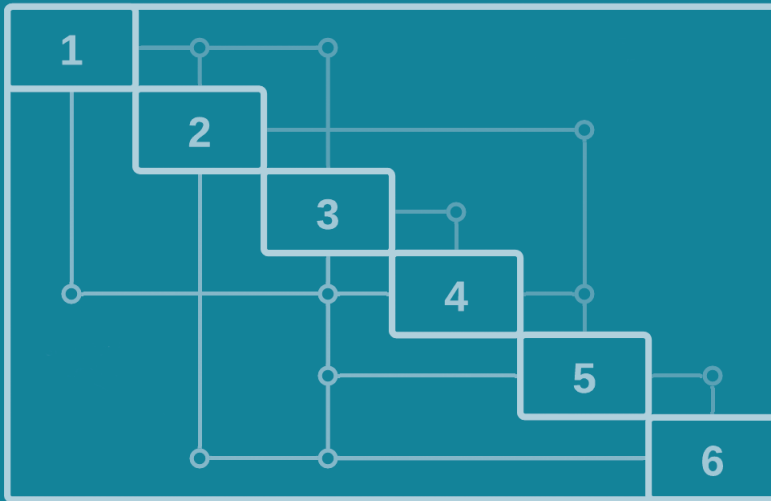


Roman Kielec

# Zarządzanie projektami produkcyjnymi w praktyce przemysłowej

Podręcznik dydaktyczny dla studentów kierunku Zarządzanie i Inżynieria Produkcji Uniwersytetu Zielonogórskiego



**Zarządzanie projektami produkcyjnymi  
w praktyce przemysłowej**



Roman Kielec

# **Zarządzanie projektami produkcyjnymi w praktyce przemysłowej**

**Podręcznik dydaktyczny dla studentów kierunku  
Zarządzanie i Inżynieria Produkcji  
Uniwersytetu Zielonogórskiego**

Zielona Góra 2025

#### **RADA WYDAWNICZA**

Mariusz Naczk (*przewodniczący*), Paweł Andrzejewski, Andrzej Bisztyga,  
Bogumiła Burda, Joanna Dec-Pietrowska, Beata Gabryś, Mariusz Jenek,  
Aleksandra Kruk, Franciszek Runiec (*sekretarz*)



UNIWERSYTET  
ZIELONOGÓRSKI

#### **RECENZJA**

Milan Edl  
Michał Sąsiadek

#### **REDAKCJA**

Beata Toczewska

#### **REDAKCJA TECHNICZNA**

#### **PROJEKT OKŁADKI**

Elżbieta Kościańska

© Copyright by Uniwersytet Zielonogórski  
Zielona Góra 2025

ISBN 978-83-7842-594-6

DOI <https://doi.org/10.59444/uz.9788378425946>

#### **OFICyna WYDAWNICZA UNIWERSYTETU ZIELONOGÓRSKIEGO**

65-246 Zielona Góra, ul. Podgórna 50, tel. 68 328 78 64  
[www.ow.uz.zgora.pl](http://www.ow.uz.zgora.pl), [sekretariat@ow.uz.zgora.pl](mailto:sekretariat@ow.uz.zgora.pl)

## Wstęp

Współczesne przedsiębiorstwa produkcyjne funkcjonują w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu, gdzie kluczowe znaczenie ma elastyczność, innowacyjność i zdolność szybkiego dostosowania się do nowych wyzwań. Jednym z największych testów dla przemysłu produkcyjnego w ostatnich latach był okres pandemii COVID-19, który wymusił na firmach poszukiwanie skutecznych strategii redukcji kosztów, utrzymania ciągłości operacyjnej oraz zachowania konkurencyjności. Wzrost kosztów produkcji, zaburzenia w łańcuchach dostaw, ograniczenia kadrowe i wymogi sanitarne wymagały nie tylko optymalizacji procesów, ale również wprowadzenia rozwiązań opartych na innowacjach technologicznych.

Jednym z kluczowych kierunków działań przedsiębiorstw jest nieustanna modernizacja infrastruktury technicznej i organizacyjnej, automatyzacja, cyfryzacja oraz rozwój kompetencji kadry. Niezmiennym oczekiwaniem klientów pozostaje otrzymanie wyrobów wysokiej jakości, w możliwie najkrótszym czasie i przy akceptowalnym koszcie. W tej sytuacji redukcja kosztów nie może odbywać się kosztem jakości, co oznacza konieczność poszukiwania bardziej efektywnych metod zarządzania produkcją, a nie zastępowania materiałów lub komponentów tańszymi, ale gorszymi jakościowo odpowiednikami.

Jedną z odpowiedzi na te potrzeby jest optymalizacja procesów produkcyjnych poprzez skracanie czasów realizacji zadań, minimalizowanie zbędnych operacji oraz redukcja tzw. sprzężeń zwrotnych, które wydłużają czas i zwiększają koszty. W tym kontekście kluczowe znaczenie mają nowoczesne narzędzia planowania i harmonogramowania produkcji. Klasyczne metody, takie jak harmonogram Gantta czy metoda sieciowa (CPM), choć powszechnie stosowane, nie zawsze pozwalają uchwycić złożone zależności pomiędzy operacjami, ani nie oferują wsparcia w optymalizacji wielokryterialnej.

Dlatego też coraz większą popularnością cieszą się nowoczesne metody, takie jak macierz sprzężeń (DSM – Design Structure Matrix), która pozwala na

identyfikację i reorganizację relacji między zadaniami w celu optymalizacji całego procesu wytwórczego. W połączeniu z algorytmami ewolucyjnymi i metodami sztucznej inteligencji DSM staje się efektywnym narzędziem w zarządzaniu złożonymi projektami produkcyjnymi.

Celem niniejszej publikacji jest zastosowanie metody DSM do optymalizacji rzeczywistego procesu produkcyjnego w przedsiębiorstwie z branży obróbki metalu, którego asortyment obejmuje m.in. obudowy metalowe, meble ze stali nierdzewnej oraz skrzynki elektryczne [14]. Dodatkowo przedsiębiorstwo rozwinęło swoją działalność o cynkownię oraz zakład recyklingu tworzyw sztucznych. W analizie procesu wykorzystano trzy podejścia: klasyczne metody sieciowe, metodę belkową oraz nowe ujęcie przebiegu procesu produkcyjnego metodę macierzową (DSM).

W rozdziale pierwszym zaprezentowano podstawowe metody planowania produkcji – harmonogram Gantta oraz metodę sieciową CPM – wraz z ich zastosowaniem i ograniczeniami. W kolejnym rozdziale szczegółowo omówiono metodę macierzy sprzężeń, ilustrując jej działanie przykładem. Trzeci rozdział zawiera opis analizowanego wyrobu, dane wejściowe oraz budowę macierzy sprzężeń, harmonogramu Gantta i diagramu sieciowego. W czwartym rozdziale przedstawiono optymalizację macierzy za pomocą autorskiego narzędzia MAG PROJECT, uwzględniając nowe kolejności realizacji zadań i ich wpływ na czas, koszt oraz liczbę sprzężeń zwrotnych. Całość kończy podsumowanie wraz z wnioskami i rekomendacjami.

W celu zachowania poufności danych operacyjnych oraz ochrony informacji wrażliwych przedsiębiorstwa, a także ze względu na fakt, iż w pracy przedstawiono rzeczywisty przypadek procesu przemysłowego, wszystkie dane dotyczące czasów realizacji zadań oraz kosztów operacji zostały przekształcone i wyrażone w jednostkach umownych (j.u.).

Takie podejście pozwala na rzetelną analizę problemu badawczego z zachowaniem zasad etyki i poufności, a jednocześnie umożliwia dokładne odwzorowanie rzeczywistego przebiegu zarządzania projektem.

Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie wielokryterialnej analizy złożonego procesu produkcyjnego, bez naruszenia interesów podmiotu gospodarczego, którego dane stały się podstawą do rozważań teoretyczno-praktycznych. Zabieg ten umożliwia również pełne odtworzenie schematu badawczo-dydaktycznego, z zachowaniem zgodności metodycznej i logicznej struktury analizowanego przypadku.

# 1. Metody harmonogramowania produkcji – zagadnienia teoretyczne

W rozdziale przedstawiono podstawowe informacje na temat diagramów sieciowych typu CPM (ang. *Critical Path Method*) oraz ich główne odmiany wykorzystywane w planowaniu i harmonogramowaniu złożonych przedsięwzięć. Omówiono również znaczenie ścieżki krytycznej w kontekście zarządzania projektami oraz jej wpływ na czas trwania realizacji zadania. W celu zilustrowania sposobu budowy i interpretacji diagramu CPM posłużono się hipotetycznym przykładem projektu, który pozwala w przystępny sposób zrozumieć zasady identyfikacji zależności czasowych pomiędzy zadaniami oraz obliczania rezerw czasowych.

## 1.1. Diagram sieciowy CPM

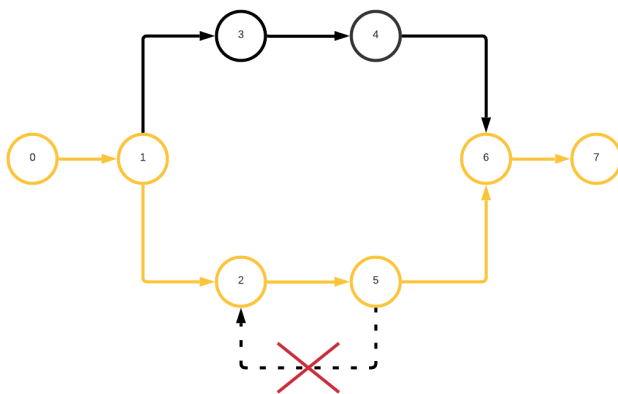
Diagramy sieciowe przedstawiają logiczne powiązania pomiędzy poszczególnymi czynnościami w projekcie [8]. Przedstawiają zarówno zależności sekwencyjne, jak i równoległe. Zależność sekwencyjna oznacza, że dane zadania muszą być realizowane jedno po drugim, zgodnie z określoną kolejnością. Przykładowo, jeśli czynność 3 musi zostać zakończona, zanim rozpocznie się czynność 4, mówi się o zależności sekwencyjnej. Tego typu relacja jest typowa dla procesów technologicznych, w których wynik jednej czynności stanowi wejście do kolejnej.

Z kolei zależności równoległe występują wtedy, gdy dwie lub więcej czynności może być realizowanych niezależnie od siebie, w tym samym czasie. Nie ma między nimi bezpośredniej wymiany informacji ani zależności technologicznej – przykładem może być równoczesne przygotowywanie dwóch elementów, które zostaną połączone dopiero na późniejszym etapie projektu (np. zadania 4 i 5).

Sprzężenia zwrotne natomiast, które nie są uwzględniane w klasycznych metodach sieciowych, dotyczą sytuacji, w których informacja z późniejszego etapu procesu musi zostać przekazana wstecz, do wcześniejszego zadania. Jest to typowe

w projektach badawczo-rozwojowych lub inżynierskich, gdzie wyniki testów lub symulacji mogą wpływać na ponowne wykonanie lub korektę wcześniejszych etapów (np. między zadaniami 5 i 2). Sprzężenia zwrotne wprowadzają dodatkową złożoność do planowania, ponieważ mogą powodować konieczność powtórzenia niektórych czynności lub zmianę wcześniej przyjętych decyzji projektowych.

Wszystkie wymienione zależności – sekwencyjne, równoległe i sprzężenia zwrotne – mają istotny wpływ na strukturę harmonogramu oraz sposób zarządzania projektem. Ich prawidłowa identyfikacja jest kluczowa dla optymalizacji zarówno czasu realizacji, jak i efektywności wykorzystania zasobów. Zależności te zilustrowano na rysunku 1.1.



Rysunek 1.1. Diagram sieciowy

Źródło: opracowanie własne.

Główną korzyścią ze stosowania diagramów sieciowych, w tym metody ścieżki krytycznej, jest możliwość ustalenia terminu zakończenia projektu oraz kiedy należy rozpocząć i zakończyć poszczególne zadania [5]. Co więcej, można określić, które zadania mają pewną swobodę w postaci rezerwy czasowej, czyli maksymalnej ilości wolnego czasu dla danej czynności. Rezerwa czasowa pozwala określić zadania krytyczne i niekrytyczne. Ścieżka krytyczna to najdłuższa seria działań w procesie, które wykonywane są sekwencyjnie i w przypadku których wydłużenie czasu zadania wpływa na czas realizacji całego projektu [5]. W praktyce może się zdarzyć tak, że wystąpi kilka ścieżek krytycznych. Jest to całkowicie normalne, gdyż czynności mogą zaczynać się w tym samym czasie i trwać tyle samo.

Metoda ścieżki krytycznej została opracowana przez Firmę DuPont w latach 50. ubiegłego stulecia. Celem była możliwość znalezienia jak najkrótszego czasu zakończenia projektu oraz wyszczególnienia zadań krytycznych, w przypadku których opóźnienie któregośkolwiek z nich spowodowałoby przedłużenie się ca-

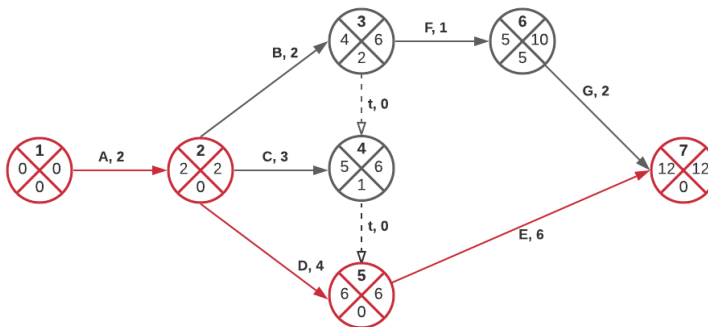
tego projektu [3]. Metoda ta była wykorzystywana do konserwacji sprzętu oraz miała spowodować wzrost efektywności w firmie, doprowadzając do redukcji czasu trwania tego procesu.

Istnieją dwie notacje diagramów sieciowych: Activity-on-arrow (AoA) oraz Activity-on-node (AoN). Metoda AoN jest zazwyczaj prostsza do narysowania niż metoda AoA [8], ponieważ metoda AoA wymaga wprowadzenia w niektórych przypadkach czynności pozornych, które mają zerowy czas trwania. Na rysunku 1.2 zbudowanym na podstawie tabeli 1.1 zaprezentowano przykład przedstawiania diagramu sieciowego za pomocą metody AoA.

Tabela 1.1. Czynności, sprzężenia oraz czas trwania zadań

Czynność	Sprzężenie	Czas trwania (dni)
A	–	2
B	A	2
C	A	3
D	A	4
E	B, C, D	6
F	B	1
G	F	2

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 1.2. Diagram sieciowy AoA

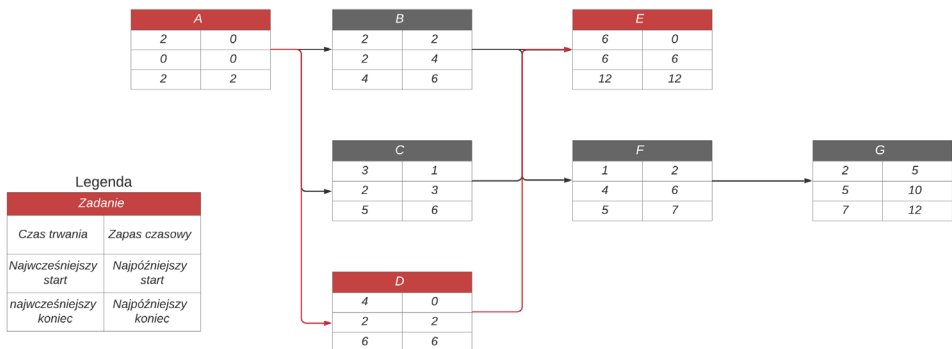
Źródło: opracowanie własne.

W diagramie na rysunku 1.2 strzałka oznacza czynność, która występuje w procesie, a jej długość nie odzwierciedla żadnej wartości. Nad strzałką znajduje się nazwa czynności oraz czas jej trwania. Okręgi oznaczają natomiast zdarzenia, czyli moment, w którym zaczyna się lub kończy dana czynność. Górna ćwiartka

okręgu to numer zdarzenia. Lewa ćwiartka oznacza najwcześniejszy możliwy termin wystąpienia danego zdarzenia, prawa ćwiartka z kolei – najpóźniejszy możliwy termin wystąpienia danego zdarzenia. Dolna ćwiartka to różnica wartości w prawej i lewej ćwiartce.

Proces rozpoczyna się od zadania A. Następnie równolegle przebiegają zadania B, C i D. Pomiędzy zdarzeniami 3, 4 i 5 występuje czynność pozorna, co oznacza, że czynność E może zostać rozpoczęta dopiero, gdy zadania B, C, D zostaną ukończone. W trakcie trwania czynności E realizowane są zadania F i G. Kolorem czerwonym została zaznaczona ścieżka krytyczna (zadania A, D, E). Zapas czasowy na ścieżce krytycznej wynosi zero, co oznacza, że czynność nie może zostać opóźniona bez ingerencji w czasie trwania projektu. Czas całego projektu to suma czasów czynności na ścieżce krytycznej i wynosi 12 dni.

Na podstawie danych z tabeli 1.1 opracowano diagram sieciowy metodą AoN (rys. 1.3).



Rysunek 1.3. Diagram sieciowy metodą AoN

Źródło: opracowanie własne.

Interpretacja jest dokładnie taka sama jak w przypadku notacji AoA. Proces rozpoczyna się od zadania A. Następnie równolegle przebiegają zadania B, C i D. Po ukończeniu zadań B, C, D następuje realizacja zadania E. Równoległe do zadania E wykonywane są zadania F i G. Kolorem czerwonym została zaznaczona ścieżka krytyczna (zadania A, D, E). Czas całego projektu wynosi 12 dni.

W AoN w przeciwieństwie do AoA strzałki nie oznaczają czynności, tylko łączą poszczególne zadania. Czynności najczęściej przedstawia się w postaci prostokątów, które złożone są z mniejszych pól, w których wpisuje się wybrane dane, takie jak np. czas trwania, rezerwa czasowa, koszt itd. Co więcej, w AoN nie występują czynności pozorne.

Wraz z rozwojem technologii metoda AoA (rys. 1.2) stała się mniej popularna i dzisiaj rzadko kiedy jest wykorzystywana. Popularniejszą metodą jest AoN (rys. 1.3), gdyż większość programów komputerowych wizualizuje projekty za jej pomocą. Program MS Project zastosowany przy przedstawieniu diagramu sieciowego dla rzeczywistego procesu produkcyjnego firmy EURO-BOX sp. z o.o. bazuje na notacji AoN, dlatego w dalszej części przedstawiono metodę graficzną z rys. 1.3.

## 1.2. Geneza klasycznej metody harmonogramowania produkcji – Gantt

Do końca lat 50. XX w. najczęściej stosowaną metodą wizualnego planowania projektów były **wykresy belkowe** [23]. Kluczową rolę w ich rozwoju odegrał **Henry L. Gantt**, który opracował sposób prezentowania zadań wraz z ich czasem realizacji i postępowaniem prac, tworząc tzw. **harmonogram Gantta** [24]. Współcześnie harmonogram ten przedstawia zadania projektowe na osi pionowej oraz oś czasu na poziomej, przy czym każda czynność ilustrowana jest za pomocą poziomej belki. Jej długość odpowiada czasowi trwania, a położenie określa moment rozpoczęcia i zakończenia danego zadania [25].

**Zaletą harmonogramów Gantta** jest ich prostota i przejrzystość – są zrozumiałe nawet dla osób bez specjalistycznego przygotowania z zakresu zarządzania projektami. Dzięki wizualizacji możliwe jest szybkie zorientowanie się w stanie realizacji projektu, identyfikacja opóźnień oraz równoległości między zadaniami [15]. Belki leżące równolegle świadczą o równoległości działań, co ułatwia koordynację prac w zespołach wielozadaniowych.

Jednakże **harmonogramy Gantta mają istotne ograniczenia**. Przede wszystkim nie odwzorowują w sposób dokładny **logicznych zależności między zadaniami**, co utrudnia planowanie złożonych projektów. Nie uwzględniają również **sprzężeń zwrotnych** oraz iteracyjnego charakteru projektów prowadzonych w podejściach iteracyjnych, gdzie działania często się powtarzają lub wymagają adaptacji. Przez to nie jest możliwe uwzględnienie współbieżnej realizacji zadań. W efekcie harmonogramy te stają się niewystarczające w przypadku wieloetapowych, dynamicznych projektów inżynierskich, IT lub badawczo-rozwojowych [16].

Współcześnie harmonogramy Gantta znajdują zastosowanie głównie w **projektach o niskiej lub umiarkowanej złożoności**, gdzie priorytetem jest przejrzystość nad precyzyjnym odwzorowaniem zależności. W zaawansowanym zarządzaniu projektami częściej stosuje się narzędzia sieciowe, takie jak **metoda ścieżki krytycznej (CPM)** oraz **technika PERT**, które umożliwiają analizę zależności między zadaniami, identyfikację ścieżki krytycznej i ocenę wpływu opóźnień [17].

W celu graficznego przedstawienia danego procesu niezbędne jest wykonanie następujących etapów:

- I etap – dekompozycja procesu,
- II etap – ustalenie czasu trwania zadań, terminów ich rozpoczęcia oraz kolejności, w których będą realizowane,
- III etap – przedstawienie w postaci graficznej z wykorzystaniem oprogramowania komputerowego, np. MS PROJECT.

W celu zobrazowania powyższych definicji i etapów skonstruowano hipotetyczny proces produkcyjny, którego zadania, czasy oraz sprzężenia zostały zaprezentowane w tabeli 1.2.

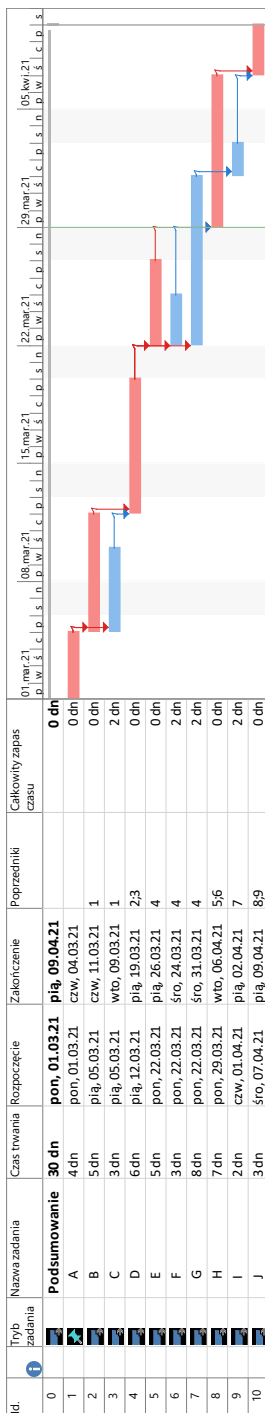
**Tabela 1.2.** Dane wejściowe hipotetycznego procesu produkcyjnego

Lp.	Nazwa zadania	Czas trwania (dni)	Sprzężenia
1	A	4	–
2	B	5	A
3	C	3	A
4	D	6	B, C
5	E	5	D
6	F	3	D
7	G	8	D
8	H	7	E, F
9	I	2	G
10	J	3	H, I

Źródło: opracowanie własne.

Następnie za pomocą programu MS PROJECT skonstruowano harmonogram Gantta (rys. 1.4) dla procesu przedstawionego w tabeli 1.2 rozpoczynającego się pierwszego marca 2021 r.

Z danych zaznaczonych na harmonogramie Gantta (rys. 1.4) wynika, że projekt potrwa 30 dni. Jest rezultatem czasu trwania zadań na ścieżce krytycznej, zaznaczonej kolorem czerwonym. Przed rozpoczęciem kolejnego zadania na ścieżce krytycznej muszą zostać zakończone poprzednie. W przedstawionym przykładzie ścieżka krytyczna obejmuje zadania A-B-D-E-H-J. Suma ich czasów równa jest najszybszemu możliwemu zakończeniu projektu, czyli 30 dni. Zadania B i C wykonywane są równolegle, dlatego czas zadania C nie wpływa na czas realizacji projektu. Analogiczna sytuacja występuje w przypadku zadań E, F, G. W przypadku rozpoczęcia się projektu pierwszego marca 2021 r. oraz zakładając, że w tygodniu



Rysunek 1.4. Harmonogram Gantta dla opracowanego przykładu  
Źródło: opracowanie własne.

praca zaczyna się o 9:00 i kończy o 18:00 z jednogodzinną przerwą między 13:00 a 14:00 oraz piątki i soboty są wolne, projekt zostanie ukończony dziewiątego kwietnia 2021 r.

Na wykresie zaznaczono również zależności między zadaniami, lecz nie są one aż tak czytelne, jak w przypadku wykresów sieciowych. Metoda Gantta, tak samo jak wykresy sieciowe, nie odzwierciedla sprzężeń zwrotnych w procesie i realizacji współbieżnej zadań.

## 2. Metoda zarządzania produkcją – Design Structure Matrix

Rozdział poświęcony jest przedstawieniu podstawowych informacji na temat macierzy sprzężeń (DSM – *Design Structure Matrix*), służącej do graficznej prezentacji procesu produkcyjnego oraz sposobu jej optymalizacji. Zagadnienia omówione w rozdziale mają na celu przybliżenie studentom metody pozwalającej na identyfikację zależności między zadaniami, ocenę stopnia złożoności procesu oraz wskazanie możliwości jego usprawnienia. Wprowadzenie macierzy sprzężeń do analizy projektów inżynierskich stanowi istotny element kształcenia w zakresie nowoczesnych metod zarządzania procesami produkcyjnymi, umożliwiając rozwijanie umiejętności analitycznego i systemowego myślenia.

### 2.1. Charakterystyka metody DSM

**Design Structure Matrix (DSM)** to narzędzie służące do modelowania, analizy i optymalizacji złożonych systemów oraz procesów, takich jak projekty inżynierskie, organizacyjne lub technologiczne. DSM przedstawia zależności pomiędzy elementami systemu w formie prostokątnej macierzy kwadratowej, gdzie zarówno wiersze, jak i kolumny reprezentują te same zadania, komponenty lub jednostki organizacyjne.

Metoda ta została po raz pierwszy zaprezentowana przez Donalda Stewarda w 1981 r. i od tego czasu zyskała szerokie zastosowanie, szczególnie w analizie procesów projektowych i produkcyjnych [10]. Główna idea polega na graficznym odwzorowaniu powiązań pomiędzy poszczególnymi elementami systemu w sposób zwarty i przejrzysty [1, 2]. Dzięki temu możliwe jest zidentyfikowanie sekwencji działań, sprzężeń zwrotnych, zależności równoległych oraz potencjalnych punktów krytycznych w procesie.

DSM (rys. 2.1) ma postać **macierzy kwadratowej o wymiarach  $m \times m$** , gdzie  $m$  oznacza liczbę zadań lub komponentów analizowanego systemu. Główna

przekątna (od lewego górnego rogu do prawego dolnego) odnosi się do zadania analizowanego – komórki poza przekątną wskazują zależności między zadaniami.

- **Wiersze** macierzy oznaczają wyjścia z działań – czyli informacje lub produkty, które są generowane przez dane zadanie.
- **Kolumny** oznaczają wejścia do działań – czyli to, czego dane zadanie potrzebuje, aby mogło zostać wykonane.  
Pozycja zależności względem przekątnej odgrywa istotną rolę [9]:
- Elementy **powyżej przekątnej** (np. w prawym górnym trójkącie macierzy) przedstawiają **sprzężenia progresywne** – wskazują, że dane zadanie przekazuje informacje do zadania następującego później.
- Elementy **poniżej przekątnej** (w lewym dolnym trójkącie) pokazują **sprzężenia zwrotne** – czyli sytuacje, w których zadanie zależy od danych pochodzących z działań późniejszych w kolejności.

Zależności te można wizualnie wyróżniać, np. sprzężenia progresywne kolorem zielonym, a zwrotne – czerwonym. Taki zabieg ułatwia analizę i szybką identyfikację pętli iteracyjnych czy nieefektywności w strukturze projektu.

DSM znajduje zastosowanie w:

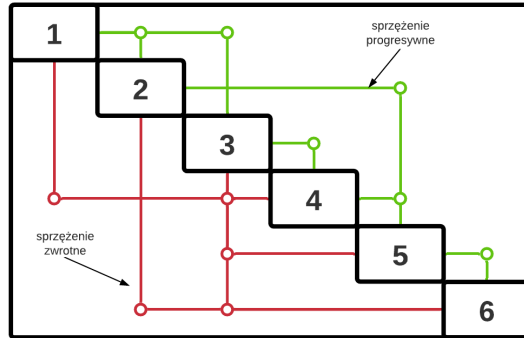
- planowaniu harmonogramów projektów (zwłaszcza przy projektach iteracyjnych),
- analizie przepływu informacji i zależności funkcjonalnych,
- optymalizacji kolejności działań,
- identyfikacji i redukcji sprzężeń zwrotnych,
- organizacji struktur zespołów projektowych.

Największe atuty DSM to:

- **Zwiężłość** – przy dużej liczbie zadań macierz pozwala na przejrzyste przedstawienie złożonych zależności.
- **Prostota interpretacji** – dzięki wizualnej formie łatwo zauważyć istotne zależności.
- **Możliwość automatyzacji** – DSM jest kompatybilna z wieloma narzędziami informatycznymi, co pozwala na szybkie przeliczenia i symulacje scenariuszy.

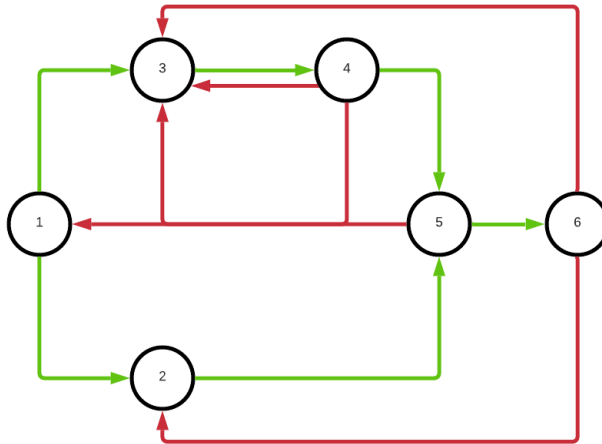
Metoda DSM stanowi skuteczne narzędzie wspierające zarządzanie projektami, szczególnie tymi, które charakteryzują się dużą złożonością, wysokim poziomem współzależności zadań oraz potrzebą optymalizacji przepływu informacji. Zrozumienie i umiejętne wykorzystanie DSM może znacząco przyczynić się do zwiększenia efektywności projektowania i wdrażania rozwiązań inżynierskich.

DSM w porównaniu z tradycyjną metodą sieciową pozwala uwzględnić i wizualizować wszystkie zależności pomiędzy zadaniami wraz ze sprzężeniami zwrotnymi w prostszy sposób niż tradycyjna metoda sieciowa (rys. 2.2).



Rysunek 2.1. Kwadratowa macierz sprzężeń

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 2.2. Przykład metody sieciowej z uwzględnieniem sprzężeń zwrotnych

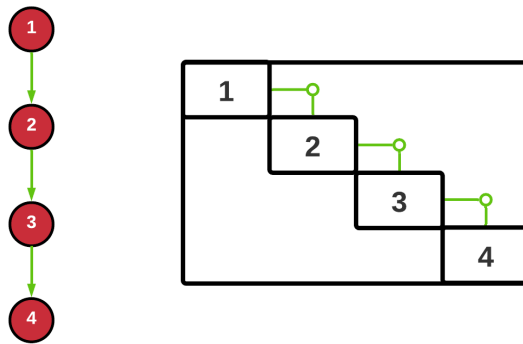
Źródło: opracowanie własne.

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 [18, 19].

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.

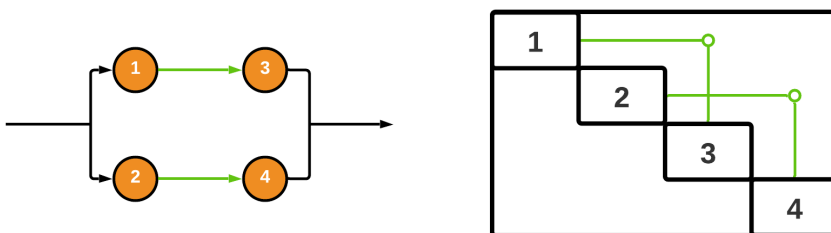
W przypadku wymiany informacji sekwencyjnej, pierwszą część pisze student, następnie przekazuje ją promotorowi, który pisze drugą część pracy. Następnie przekazuje on pracę z powrotem do studenta, który pisze trzecią część pracy, a następnie oddaje ją promotorowi, który publikuje pracę.



Rysunek 2.3. Przykłady realizacji sekwencyjnej – model sieciowy oraz DSM

Źródło: opracowanie własne.

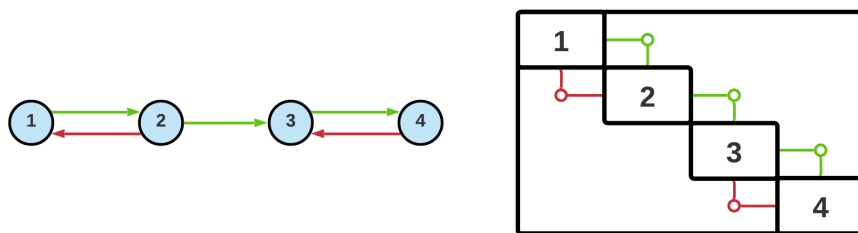
Kolejnym rodzajem wymiany informacji jest realizacja równoległa (rys. 2.4). Przedstawiając to na przykładzie studenta i promotora, wyglądałoby to następująco. Student i promotor w tym samym czasie piszą połowę pracy, następnie łączą ją w całość i publikują.



Rysunek 2.4. 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 publikację równoległe, stale się komunikując i wymieniając informacje pomiędzy sobą.



Rysunek 2.5. Przykłady realizacji współbieżnej – model sieciowy oraz DSM

Źródło: opracowanie własne.

## 2.2. Określenie funkcji celu macierzy sprzężeń za pomocą metody sekwencjonowania wykorzystującej permutacje

Sekwencjonowanie to zmiana kolejności realizacji zadań w taki sposób, aby nowy układ nie zawierał sprzężeń zwrotnych. DSM przekształca się w taki sposób, aby wszystkie sprzężenia zwrotne znajdowały się powyżej głównej przekątnej macierzy [11]. W przypadku złożonych procesów produkcyjnych bardzo rzadko zdarza się, aby manipulacja układem zadań doprowadziła do wyeliminowania sprzężeń zwrotnych. Dlatego w praktyce prawie zawsze występują. Dąży się do minimalizacji ich liczby lub translokacji jak najbliżej głównej przekątnej w celu zmniejszenia liczby zadań leżących wewnątrz sprzężenia zwrotnego, ponieważ to one powodują wydłużenie czasu realizacji, jak i zwiększenia kosztu projektu.

Istnieje kilka podejść stosowanych w sekwencjonowaniu DSM [13], lecz w pracy wykorzystano sekwencjonowanie oparte na permutacji. Funkcja celu dla macierzy sprzężeń ogranicza się do obliczenia kosztu i czasu dla każdej możliwej permutacji układów czynności, których maksymalną liczbę określa  $n!$ . Za pomocą tej metody można wyznaczyć optymalne rozwiązanie spośród wszystkich możliwych wygenerowanych układów zadań w macierzy sprzężeń. Do zaprezentowania powyższej metody posłużono się wymyślnym, trzyzadaniowym procesem produkcyjnym (tabela 2.1).

Dla trzyzadaniowego procesu liczba różnych wariantów ułożenia czynności na przekątnej wynosi  $3!$ , co skutkuje w możliwości ułożenia 9 różnych układów. Dla każdego układu zostanie obliczony całkowity czas oraz koszt realizacji procesu uwzględniający sprzężenia zwrotne. Występowanie sprzężeń zwrotnych powoduje konieczność powtarzania czynności dla tego sprzężenia. Waga realizacji iteracji przyjmuje wartości od 0 do 1. Wybór wagi równy 0,5 oznacza, że każda ponowna realizacja zadania znajdującego się wewnątrz sprzężenia zwrotnego zajmuje 50% czasu oraz kosztu.

Tabela 2.1. Czasy, koszty oraz sprzężenia trzyzadaniowego przedsięwzięcia

Zadanie	Koszt	Czas	Sprzężenia
1.	3	5	–
2.	2	6	1, 3
3.	4	3	1
Suma	TC = 9	TT = 14	–

Źródło: opracowanie własne.

Wzór obliczenia całkowitego czasu będzie wyglądał następująco:

$$TT = \sum_{i=1}^n T_i + \omega \cdot \sum_{s=0}^k FT_s, \quad (1.1)$$

gdzie:

$n$  – liczba zadań,

$k$  – liczba sprzężeń,

$\omega$  – waga realizacji iteracji,

$TT$  – całkowity czas procesu produkcyjnego,

$T_i$  – sekwencyjny czas realizacji czynności  $i$ ,

$FT_s$  – czas realizacji wynikający ze sprzężenia zwrotnego  $s$ .

Natomiast wzór obliczenia kosztu całkowitego jest taki sam jak wzór 1.1, tylko zamiast czasu podstawiamy koszt:

$$TC = \sum_{i=1}^n C_i + \omega \cdot \sum_{s=0}^k FC_s, \quad (1.2)$$

gdzie:

$n$  – liczba zadań,

$k$  – liczba sprzężeń,

$\omega$  – waga realizacji iteracji,

$TC$  – całkowity koszt procesu produkcyjnego,

$C_i$  – koszt realizacji czynności  $i$ ,

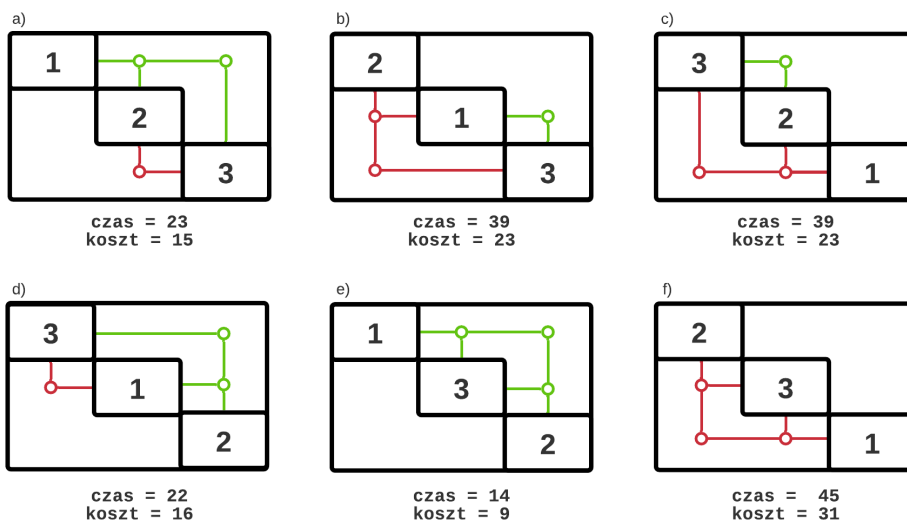
$FC_s$  – koszt realizacji wynikający ze sprzężenia zwrotnego  $s$ .

Wykorzystując dane z tabeli 2.1, obliczono czas i koszt poszczególnych wariantów ustawień czynności na przekątnej macierzy. Przyjęto wagę realizacji iteracji równą 1, ponieważ założono, że każda ponowna realizacja zadania znajdującego się wewnątrz sprzężenia zwrotnego realizowana jest ponownie w całym zakresie. Dla pierwszego wariantu, podstawiając dane, otrzymujemy następujący wynik:

$$\begin{aligned} TT &= \sum_{i=1}^3 T_i + \omega \cdot \sum_{s=0}^2 FT_s = (T_1 + T_2 + T_3) + 1 \cdot FT_1 = \\ &= (T_1 + T_2 + T_3) + (T_2 + T_3) = (5 + 6 + 3) + (6 + 3) = 23 \end{aligned}$$

$$TC = \sum_{i=1}^3 C_i + \omega \cdot \sum_{s=0}^2 FC_s = (C_1 + C_2 + C_3) + 1 \cdot FC_1 = \\ = (C_1 + C_2 + C_3) + (C_2 + C_3) = (3 + 2 + 4) + (2 + 4) = 15$$

W ten sam sposób obliczono pozostałe warianty oraz zaprezentowano wyniki na rysunku 2.6.



Rysunek 2.6. Warianty rozwiązań dla trzyzadaniowej macierzy

Źródło: opracowanie własne.

Układ e) jest najlepszym wariantem, ponieważ jego czas realizacji wynosi 14 jednostek czasu oraz 9 jednostek kosztu. W każdym przypadku oprócz e) występują sprzężenia zwrotne. Powodem tego jest zła sekwencja realizacji poszczególnych zadań po przeprowadzeniu dekompozycji całego modelu. Zmiana kolejności wykonywanych czynności nie powoduje usunięcia połączeń sprzężeń zwrotnych, lecz przemieszcza je nad główną przekątną, powodując, iż wystąpią tylko sprzężenia progresywne. Każda inna kolejność wykonywania zadań powoduje występowanie sprzężeń zwrotnych, co skutkuje wydłużeniem czasu i zwiększeniem kosztu procesu produkcyjnego.

Po uzyskaniu najlepszego rozwiązania (przykład e) można dodatkowo rozważyć realizację równoległą i współbieżną, która powoduje kolejne skrócenie czasu i zmniejszenie kosztu, jednocześnie zwiększając jakość wyrobu. W przykładzie e) jednak zadania występują tylko sekwencyjnie.

W praktyce nie zdarzają się trzyzadaniowe procesy produkcyjne. W procesie produkcyjnym obudowy instalacji elektrycznej analizowanym w niniejszej pracy

liczba czynności wynosi 33. Oznacza to, że różnych układów zadań przedstawionych na głównej przekątnej macierzy jest aż  $33!$ , czyli w przybliżeniu  $8,68 \cdot 10^{36}$ .

W przedsiębiorstwie EURO-BOX sp. z o.o. analizę wdrożenia metodologii realizacji współbieżnej oraz równoległej dokonuje się na podstawie potencjału zasobowego, takiego jak: liczba pracowników, liczba maszyn, wielkości parku maszynowego oraz jego finansowanie. Do optymalizacji macierzy wykorzystano program komputerowy wykorzystujący algorytm ewolucyjny.

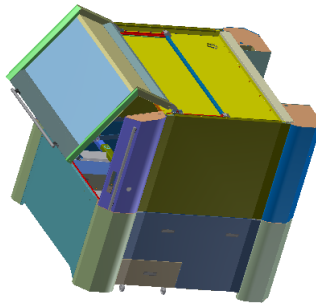
### **3. Zastosowanie macierzy sprzężeń na rzeczywistym przykładzie firmy EURO-BOX sp. z o.o.**

W rozdziale przedstawiono rzeczywisty proces produkcyjny skrzynki elektrycznej, stanowiący przykład praktycznego zastosowania wiedzy inżynierskiej w warunkach przemysłowych. Na podstawie zebranych danych zidentyfikowano poszczególne etapy procesu oraz powiązania między nimi, a następnie zastosowano macierz sprzężeń (DSM) w celu optymalizacji jego przebiegu pod kątem skrócenia czasu realizacji, zmniejszenia kosztów oraz liczby sprzężeń zwrotnych. W dalszej części rozdziału zaprezentowano ten sam proces przy użyciu harmonogramu Gantta oraz diagramu sieciowego CPM, co umożliwiło porównanie wyników oraz ocenę efektywności poszczególnych metod planowania. Taka struktura rozdziału ma również na celu rozwinięcie u studentów umiejętności porównawczej analizy narzędzi zarządzania projektami inżynierskimi.

#### **3.1. Reprezentacja przebiegu procesu produkcyjnego w firmie EURO-BOX sp. z o.o. przy pomocy DSM**

Przedsiębiorstwo produkcyjne EURO-BOX sp. z o.o. 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).

Przy wykorzystaniu programu MAG PROJECT udostępnionego przez firmę EURO-BOX sp. z o.o. stworzona została macierz sprzężeń bazująca na zbudowanej i opisanej poniżej tabeli, przedstawiającej nazwę czynności, czas, koszt oraz sprzężenia. Tabelę 3.1 sporządzono przy współdziałaniu pracowników oddziału planowania, konstrukcyjnego, technologicznego, magazynowego, produkcyjnego oraz Prezesa Zarządu.



**Rysunek 3.1.** Obudowa części elektrycznych

Źródło: Wewnętrzna dokumentacja firmy EURO-BOX sp. z o.o. [12].

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).

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 EURO-BOX jedynie za pomocą tradycyjnych metod nieuwzględniających wszystkich możliwości obiegu informacji. Dopiero zapoznanie się z nowymi metodami planowania produkcji wpłynęło na zmianę podejścia do analizowania procesu produkcyjnego.

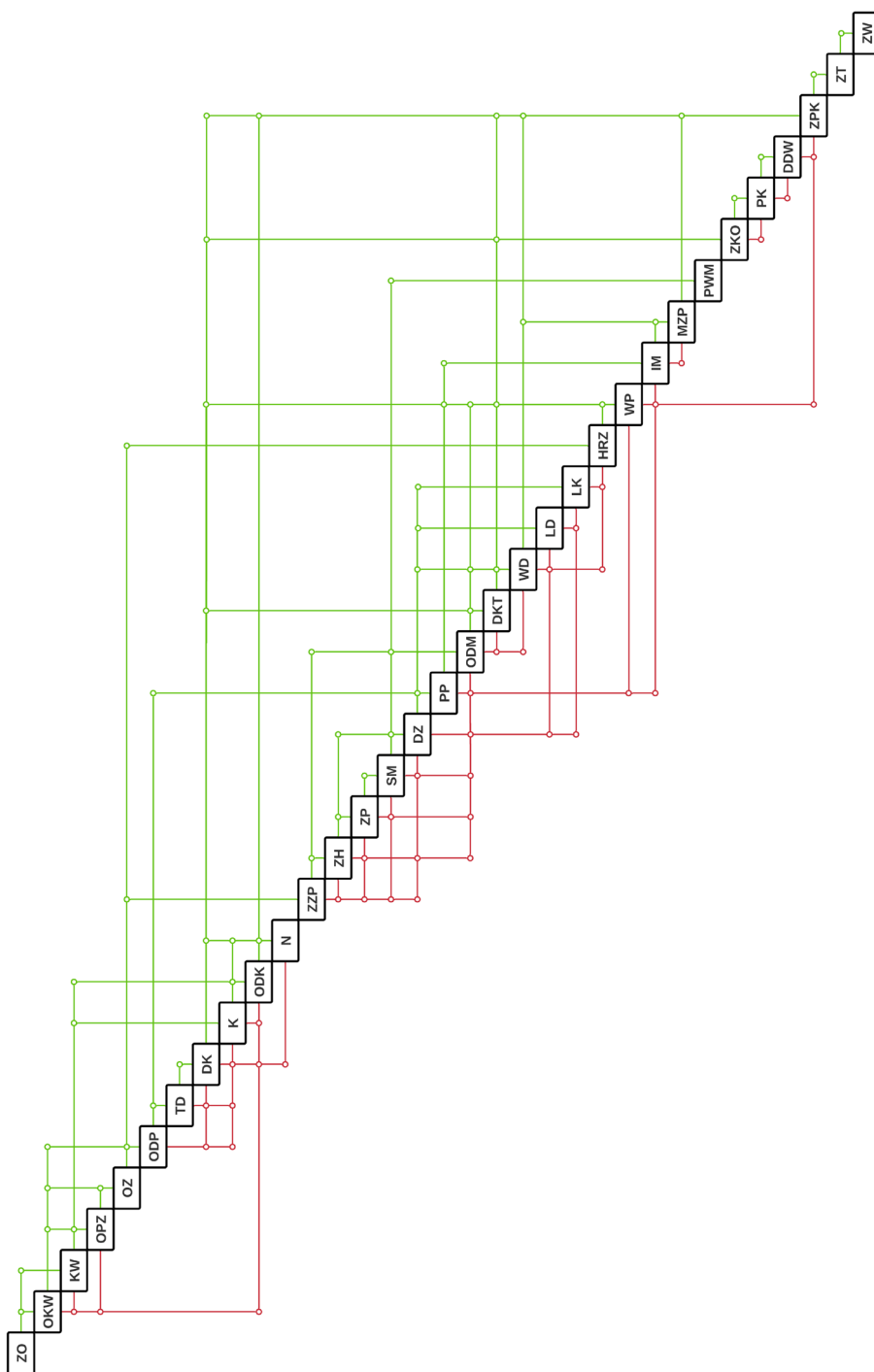
Następnie na poniższej macierzy zaznaczono klastry, czyli grupy powiązanych ze sobą zadań poprzez sprzężenie zwrotne [4, 20] (rys. 3.3). Ma to na celu pogłębienie analizy oraz uwzględnienie równoległości oraz współbieżności wykonywanych zadań.

Na rysunku 3.3 przedstawiono macierz sprzężeń rzeczywistego przebiegu procesu produkcyjnego w firmie EURO-BOX sp. z o.o. Zaznaczono na niej pięć klastrów. W trzech z nich znajdują się pojedyncze zadania ZO, ZT, ZW, natomiast w dwóch pozostałych klastrach, A – 10 czynności (OKW, KW, OPZ, OZ, ODP, TD,

**Tabela 3.1.** Sekwencja realizacji produkcji dla wybranego produktu

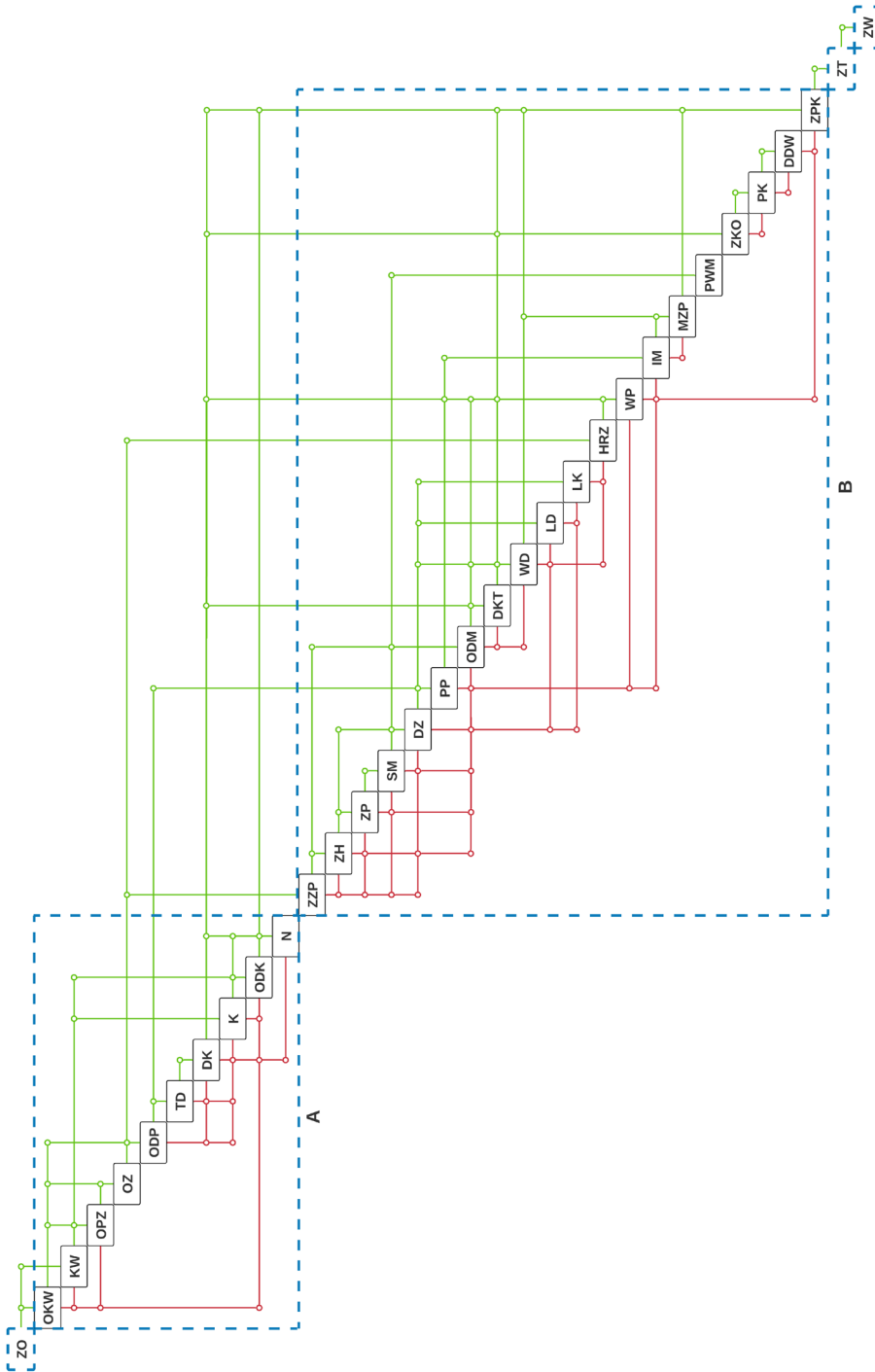
Lp.	Nazwa	Skrót	Czas [j.u.]	Koszt [j.u.]	Sprzężenia
1	Zapytanie ofertowe	ZO	1	30	–
2	Opracowanie koncepcji wstępnej	OKW	8	240	1, 3, 4, 10
3	Kalkulacja wstępna	KW	2	90	1
4	Opinia Prezesa Zarządu	OPZ	1	100	2,3
5	Otwarcie zlecenia	OZ	1	30	2, 4
6	Opracowanie dokumentacji prototypowej	ODP	4	180	2, 5, 8, 9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

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 3.2. Macierz sprzężeń przed optymalizacją

Źródło: opracowanie własne.



**Rysunek 3.3.** Klasy w macierzy sprzężeń przed optymalizacją  
 Źródło: opracowanie własne.

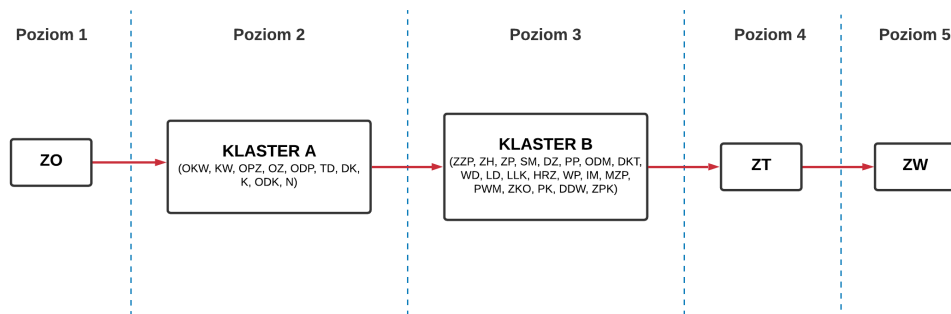
**Tabela 3.2.** Czas, koszty oraz sprzężenia zwrotne procesu produkcyjnego przed optymalizacją

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

Źródło: opracowanie własne.

DK, K, ODK, N) oraz B – 20 czynności (ZPP, ZH, ZP, SM, DZ, PP, ODM, DKT, WD, LD, LK, HRZ, WD, LD, LK, HRZ, WP, IM, MZP, PWM, ZKO, PK, DDW, ZPK). Realizacja tych klastrów odbywa się w sposób sekwencyjny, co w znaczący sposób wpływa na niekorzystny efekt ekonomiczny przedsięwzięcia.

Aby lepiej zwizualizować koncepcję klastrów, przedstawiono je hierarchicznie za pomocą grafu (rys. 3.4).



**Rysunek 3.4.** Hierarchiczny model w realizacji zadań z uwzględnieniem klastrów

Źródło: opracowanie własne.

Cały proces przebiega na pięciu poziomach hierarchicznych. Na pierwszym poziomie znajduje się tylko jedno zadanie ZO. Kolejny poziom to klaster składający się z 10 zadań, pomiędzy którymi występują sprzężenia zwrotne i pętle iteracyjne. Na poziomie trzecim znajduje się klaster B, złożony z 20 czynności powiązanych sprzężeniami zwrotnymi i pętlami iteracyjnymi. Dwa ostatnie poziomy zawierają pojedyncze zadania.

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 [21, 22].

### 3.2. Reprezentacja przebiegu procesu produkcyjnego w wybranym przedsiębiorstwie – harmonogram Gantta, CPM

Na podstawie opracowanej i przekazanej przez pracowników firmy EURO-BOX sp. z o.o. tabeli 3.1 skonstruowano harmonogram Gantta oraz diagram sieciowy dla procesu produkcyjnego obudowy z rysunku 3.1. W firmie EURO-BOX sp. z o.o. praca odbywa się na dwie ośmiogodzinne zmiany, co przekłada się na 16-godzinny dzień pracy.

Tabela 3.3. Dane wejściowe do programu MS Project przed optymalizacją

Id.	Tryb zadan	Nazwa zadania	Czas trwania	Całkowity zapas czasu	Koszt	Rozpoczęcie	Zakończenie	Poprzedniki
0		<b>Podsumowanie</b>	<b>347 godz.</b>	<b>0 godz.</b>	<b>42 900,00 j.u. pią, 01.01.21</b>	<b>pon, 01.02.21</b>		
1		Zapytanie ofertowe	1 godz.	0 godz.	30,00 j.u. pią, 01.01.21	pią, 01.01.21		
2		Opracowanie koncepcji wstępnej	8 godz.	0 godz.	240,00 j.u. pią, 01.01.21	pią, 01.01.21	1	
3		Kalkulacja wstępna	2 godz.	6 godz.	90,00 j.u. pią, 01.01.21	pią, 01.01.21	1	
4		Opinia Prezesa Zarządu	1 godz.	0 godz.	100,00 j.u. pią, 01.01.21	pią, 01.01.21	2;3	
5		Otwarcie zlecenia	1 godz.	0 godz.	30,00 j.u. pią, 01.01.21	pią, 01.01.21	2;4	
6		Opracowanie dokumentacji prototypowej	4 godz.	0 godz.	180,00 j.u. pią, 01.01.21	pon, 04.01.21	2;5	
7		Tłumaczenie dokumentacji	3 godz.	0 godz.	150,00 j.u. pon, 04.01.21	pon, 04.01.21	6	
8		Dokumentacja konstrukcyjna	200 godz.	0 godz.	16 000,00 j.u. pon, 04.01.21	śro, 20.01.21	7	
9		Kalkulacja	32 godz.	298 godz.	2 240,00 j.u. pią, 01.01.21	wto, 05.01.21	3	
10		Oferta dla klienta	3 godz.	298 godz.	90,00 j.u. wto, 05.01.21	wto, 05.01.21	3;9	
11		Negocjacje	11 godz.	118 godz.	1 050,00 j.u. śro, 20.01.21	czw, 21.01.21	8;9;10	
12		Zatwierdzenie zamówienia na prototyp	2 godz.	199 godz.	80,00 j.u. pią, 01.01.21	pią, 01.01.21	5	
13		Złedzenie handlowe	1 godz.	199 godz.	30,00 j.u. pon, 04.01.21	pon, 04.01.21	12	
14		Zlecenie produkcyjne	1 godz.	199 godz.	30,00 j.u. pon, 04.01.21	pon, 04.01.21	13	
15		Stan magazynowy	1 godz.	199 godz.	20,00 j.u. pon, 04.01.21	pon, 04.01.21	14	
16		Dział zakupów	1 godz.	199 godz.	20,00 j.u. pon, 04.01.21	pon, 04.01.21	13;15	
17		Projekt prototypu	5 godz.	235 godz.	200,00 j.u. pon, 04.01.21	pon, 04.01.21	6	
18		Opracowanie drzewa materiałowego	2 godz.	199 godz.	60,00 j.u. pon, 04.01.21	pon, 04.01.21	12;15;16	
19		Dokumentacja – karty technologiczne	6 godz.	0 godz.	180,00 j.u. śro, 20.01.21	czw, 21.01.21	8;18	
20		Wykonanie detali	79 godz.	0 godz.	6 320,00 j.u. czw, 21.01.21	czw, 28.01.21	16;18;19	
21		Lista dostawców	1 godz.	329 godz.	25,00 j.u. pon, 04.01.21	pon, 04.01.21	16	
22		Lista kooperacji	2 godz.	328 godz.	50,00 j.u. pon, 04.01.21	pon, 04.01.21	16	
23		Akceptacja Harmonogramu realizacji zlecenia	2 godz.	242 godz.	60,00 j.u. pią, 01.01.21	pią, 01.01.21	5	
24		Wykonanie prototypu	92 godz.	31 godz.	10 480,00 j.u. czw, 21.01.21	czw, 28.01.21	8;17;18;19;23	
25		Instrukcja montażu	24 godz.	259 godz.	1 680,00 j.u. pon, 04.01.21	wto, 05.01.21	17	
26		Montaż zespołów i podzespołów	37 godz.	0 godz.	2 960,00 j.u. czw, 28.01.21	pon, 01.02.21	20;25	
27		Przekazanie wytycznych do magazynu	2 godz.	329 godz.	70,00 j.u. pon, 04.01.21	pon, 04.01.21	15	
28		Zebrań kierowników oddziałów	1 godz.	118 godz.	60,00 j.u. czw, 21.01.21	czw, 21.01.21	8;19	
29		Protokół końcowy	2 godz.	118 godz.	60,00 j.u. czw, 21.01.21	czw, 21.01.21	28	
30		Dokumentacja do wysyłki	2 godz.	118 godz.	60,00 j.u. czw, 21.01.21	czw, 21.01.21	29	
31		Zatwierdzenie prototypu przez klienta	3 godz.	0 godz.	90,00 j.u. pon, 01.02.21	pon, 01.02.21	8;10;19;20;26	
32		Zamówienie transportu	1 godz.	0 godz.	25,00 j.u. pon, 01.02.21	pon, 01.02.21	31	
33		Załadunek i wysyłka	3 godz.	0 godz.	140,00 j.u. pon, 01.02.21	pon, 01.02.21	32	

Źródło: opracowanie własne.



Na podstawie danych wejściowych z tabeli 3.3 przedstawiono na rysunku 3.5 wszystkie zadania w procesie produkcyjnym, podając ich czas, koszt, datę rozpoczęcia oraz poprzedników. Po wybraniu terminu rozpoczęcia projektu program MS Project automatycznie obliczył całkowity zapas czasu oraz rozpoczęcie i zakończenie każdego zadania. Zadania, dla których rezerwa czasowa jest równa zero, to czynności krytyczne zaznaczone na czerwono.

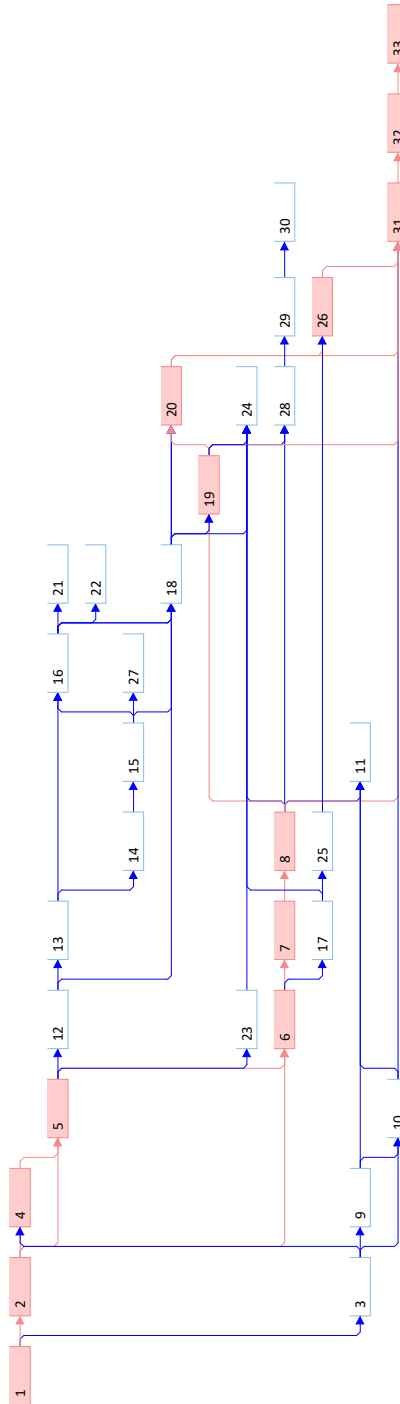
Z harmonogramu Gantta (rys. 3.5) wynika, że ścieżka krytyczna obejmuje następujące zadania: zapytanie ofertowe, opracowanie koncepcji wstępnej, opinię prezesa zarządu, otwarcie zlecenia, opracowanie dokumentacji prototypowej, tłumaczenie dokumentacji, dokumentację konstrukcyjną, dokumentację – kart technologicznych, wykonanie detali, montaż zespołów i podzespołów, zatwierdzenie prototypu przez klienta, zamówienie transportu oraz załadunek i wysyłkę. Zadania zaznaczone w harmonogramie na niebiesko odbywają się równolegle do zadań z ścieżki krytycznej. Suma czasów zadań na ścieżce krytycznej równa się najszybszemu możliwemu zakończeniu projektu. Całkowity czas zadań na ścieżce krytycznej wynosi 347 j.u., lecz dla ulepszenia analizy przyjęto, że jednostki umowne w tym konkretnym przypadku zostaną zaprezentowane jako godziny. Jeśli projekt zacznie się w pierwszego stycznia 2021 r., zakończy się pierwszego lutego 2021 r. i całkowity koszt projektu wyniesie 42 900 j.u.

Harmonogram Gantta nie odzwierciedla sprzężeń zwrotnych w procesie produkcyjnym firmy EURO-BOX sp. z o.o., dlatego przedstawione wyniki nie pokazują rzeczywistych relacji i czasów pomiędzy zadaniami. Występują ukryte połączenia pomiędzy czynnościami, które teoretycznie nie są uwzględnione w całkowitym czasie realizacji procesu, co powoduje, że w praktyce czas procesu produkcyjnego jest dłuższy.

Na podstawie tych samych danych wejściowych co w przypadku harmonogramu Gantta skonstruowano w programie MS Project diagram sieciowy (rys. 3.6).

Czynności krytyczne zaznaczone na czerwono na diagramie sieciowym CPM (rys. 3.6) obejmują te same zadania, jak na wykresie Gantta (rys. 3.5). Czynności znajdujące się na tym samym poziomie, tzn. leżące równolegle pod sobą lub nad sobą, oznaczają, że są wykonywane równolegle do siebie. Koszt, czas, daty rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych czynności są takie same jak w przypadku harmonogramu Gantta, różnią się tylko graficzną prezentacją.

Wykres sieciowy, tak samo jak w przypadku harmonogramu Gantta, nie odzwierciedla wszystkich rzeczywistych sprzężeń (w tym zwrotnych) w procesie produkcyjnym firmy EURO-BOX sp. z o.o., dlatego otrzymane wyniki nie przedstawiają rzeczywistej sytuacji.



Rysunek 3.6. Diagram sieciowy CPM oryginalnego przebiegu procesu produkcyjnego

Zródło: opracowanie własne.

## **4. Analiza przebiegu procesu produkcyjnego po optymalizacji**

W rozdziale przedstawiono zoptymalizowaną macierz sprzężeń przebiegu procesu produkcyjnego skrzynki elektrycznej. Następnie zaprezentowano nowy przebieg produkcji za pomocą harmonogramu Gantta oraz diagramu sieciowego.

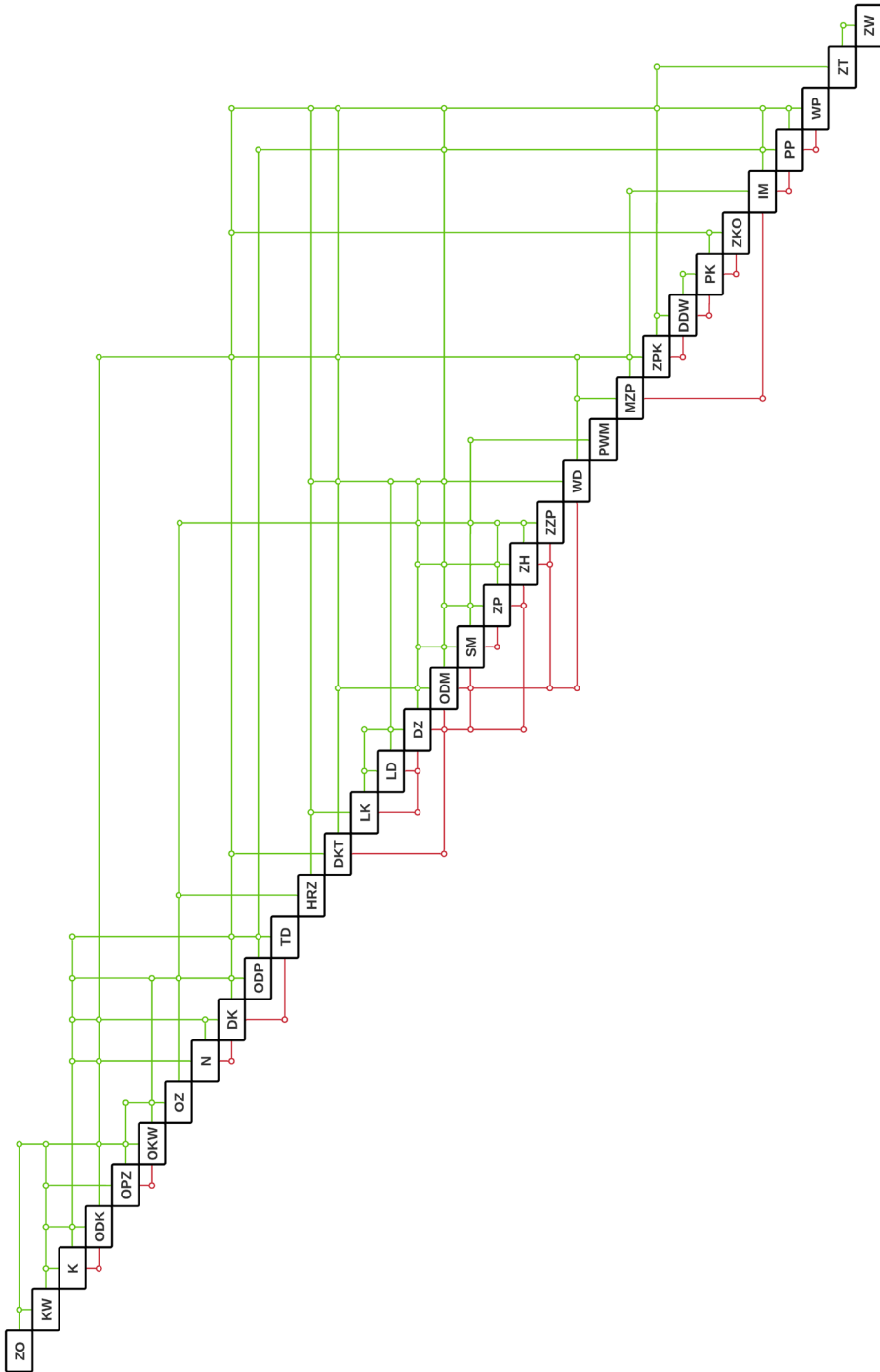
### **4.1. Reprezentacja przebiegu procesu produkcyjnego po optymalizacji za pomocą macierzy sprzężeń**

Za pomocą 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 została przekształcona na sprzężenia progresywne w wyniku zmiany kolejności zadań na przekątnej macierzy.

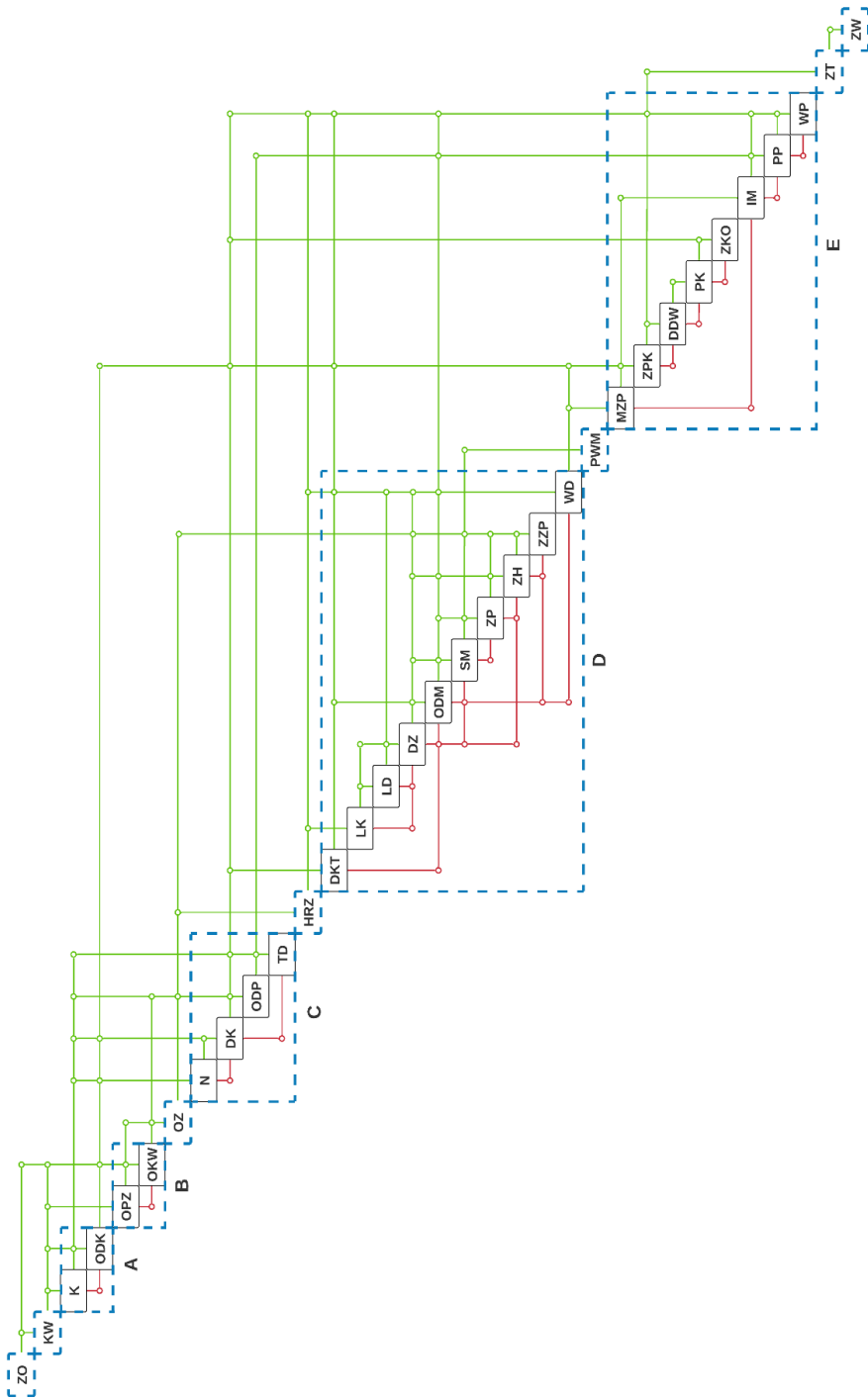
Dla macierzy z rysunku 4.1 przedstawiono w tabeli 4.1 informacje na temat kosztu czasu oraz ilości sprzężeń w nowej zoptymalizowanej macierzy w zestawieniu z macierzą opracowaną z oryginalnego przebiegu procesu produkcyjnego w firmie EURO-BOX sp. z o.o.

Po optymalizacji całkowity czas procesu produkcyjnego skrócił się z 1433 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. do 18 489 j.u.



Rysunek 4.1. Macierz sprzężeń po optymalizacji

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 4.2. Klasy w macierzy sprzężeń po optymalizacji

Źródło: opracowanie własne.

**Tabela 4.1.** Czas, koszty oraz sprzężenia zwrotne procesu produkcyjnego po optymalizacji

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

Źródło: opracowanie własne.

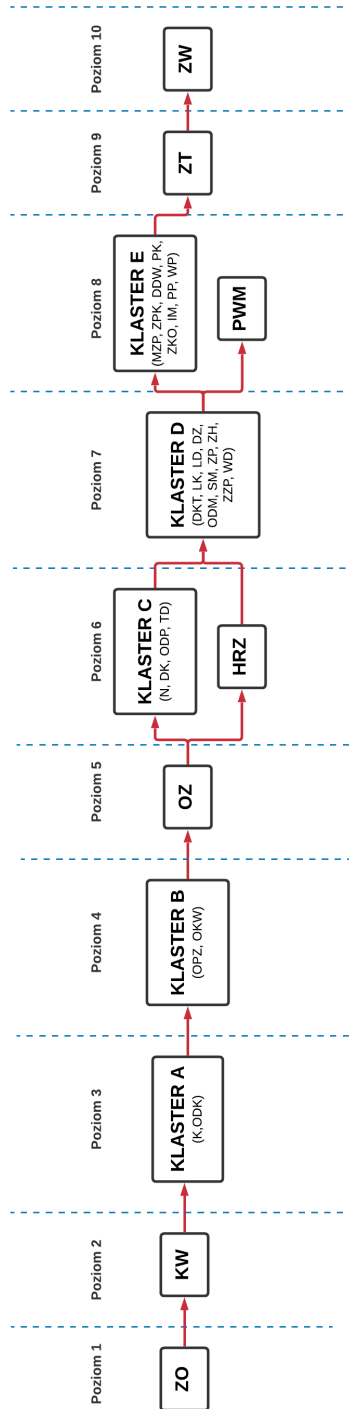
Analogicznie jak w przypadku macierzy przed optymalizacją zaznaczono klastry (rys. 4.2) w celu pogłębienia analizy, czyli uwzględnienia równoległości oraz współbieżności wykonawczych zadań.

Na rysunku 4.2 przedstawiono macierz sprzężeń po optymalizacji rzeczywistego przebiegu procesu produkcyjnego w firmie EURO-BOX sp. z o.o. Zaznaczono na niej 12 klastrow. W siedmiu z nich znajdują się pojedyncze zadania ZO, KW, OZ, HRZ, PWM, ZT, ZW, natomiast w pięciu pozostałych: klastrze A – dwie czynności (K, ODK), klastrze B – dwie czynności (OPZ, OKW), klastrze C – cztery czynności (N, DK, ODP, TD), klastrze D – 10 czynności (DKT, LK, LD, DZ, ODM, SM, ZP, ZH, ZZP, WD), klastrze E – osiem czynności (MZP, ZPK, DDW, PK, ZKO, IM, PP, WP).

Następnie w celu lepszej wizualizacji i przygotowania do pogłębionej analizy przedstawiono klastry hierarchicznie za pomocą grafu (rys. 4.3).

W porównaniu z macierzą przed optymalizacją liczba poziomów zwiększyła się z 5 do 10. Pomimo zwiększonej liczby poziomów realizacyjnych rozwiązanie po optymalizacji jest ekonomicznie uzasadnione. Na czas i koszt wpływa ilość sprzężeń zwrotnych oraz liczba zawartych w nich zadań. Jeżeli zwiększymy liczbę poziomów wykonawczych, a zmniejszymy ilość zadań do poprawy i zbliżymy sprzężenia zwrotne do głównej przekątnej, to automatycznie zmniejszy się całkowity koszt i skróci czas realizacji projektu.

Na pierwszym poziomie znajduje się tylko jedno zadanie ZO. Drugi poziom składa się tylko z zadania KW. Kolejne dwa poziomy składają się z jednego klastra złożonego z dwóch współbieżnych zadań. Klaster A z czynności K i ODK, a klaster B z OPZ i OKW. Na poziomie piątym znajduje się jedno zadanie OZ. Na poziomie szóstym znajduje się klaster C, złożony z czynności N, DK, ODP oraz

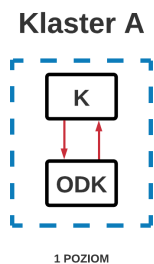


Rysunek 4.3. Hierarchiczny model w realizacji zadań z uwzględnieniem klastrów  
Źródło: opracowanie własne.

TD powiązanych sprzężeniami zwrotnymi i pętlami iteracyjnymi, wykonywany równoległe z zadaniem HRZ. Na poziomie siódmym znajduje się klaster D złożony z zadań DKT, LK, LD, DZ, ODM, SM, ZP, ZH, ZZP oraz WD, również powiązanych sprzężeniami zwrotnymi i pętlami iteracyjnymi. Ósmy poziom składa się z klastra E złożonego z zadań MZP, ZPK, DDW, PK, ZKO, IM, PP oraz WP, powiązanych sprzężeniami zwrotnymi i pętlami iteracyjnymi, wykonywanego równoległe z zadaniem PWM. Dwa ostatnie poziomy zawierają pojedyncze zadania ZT oraz ZW.

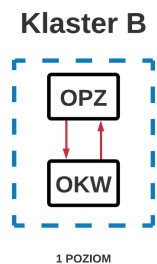
Następnie przeanalizowano każdy klaster oddzielnie, uwzględniając możliwości produkcyjne firmy, dążąc do minimalizacji czasu procesu produkcyjnego.

W klastrze A zadania wykonywane są na jednym poziomie, przedstawionym na rysunku 4.4. Zadania K i ODK wykonywane są współbieżnie, co oznacza, że kalkulacje i oferta dla klienta wykonywane są w tym samym czasie wraz z ciągłym przepływem informacji między tymi dwoma czynnościami. Przedstawiając ofertę klientowi, warto w tym samym czasie odnosić się do poczynionych kalkulacji, aby zaoszczędzić czas. Czas potrzebny na wykonanie klastra A jest równy czasowi realizacji dłuższej czynności, czyli kalkulacji, i wynosi 32 j.u., a koszt równy jest sumie tych dwóch czynności, czyli 2330 j.u.



**Rysunek 4.4.** Analiza czynności w klastrze A

Źródło: opracowanie własne.



**Rysunek 4.5.** Analiza czynności w klastrze B

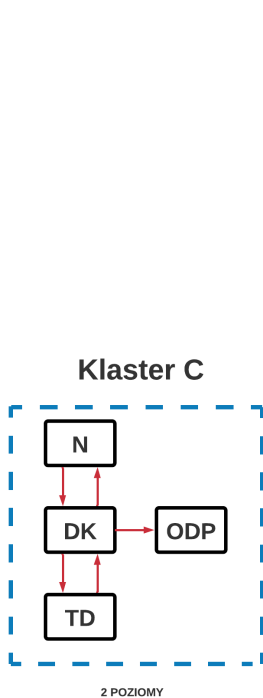
Źródło: opracowanie własne.

W klastrze B czynności wykonywane są na jednym poziomie, przedstawionym na rysunku 4.5. Zadania opracowanie koncepcji wstępnej i opinia prezesa zarządu wykonywane są współbieżnie. Udział prezesa zarządu, który występuje w roli decydenta, w pracach nad wstępną koncepcją pozwala zaoszczędzić czas, który zostałby przez niego przeznaczony, gdyby miał oceniać koncepcję po jej wykonaniu. Czas potrzebny na wykonanie Klastra B jest równy czasowi OKW, czyli 8 j.u., natomiast koszt wynosi 340 j.u.

W klastrze C zadania wykonywane są na dwóch poziomach przedstawionych na rysunku 4.6. Zadania N i TD wykonywane są współbieżnie z zadaniem DK, czyli

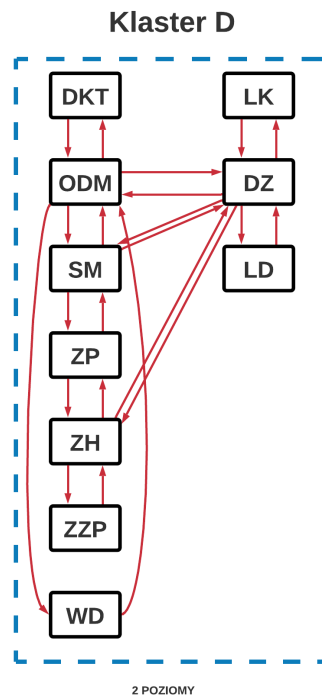
negocjacje i tłumaczenie dokumentacji wykonywane są współbieżnie z dokumentacją konstrukcyjną. Po ukończeniu czynności DK następuje rozpoczęcie czynności ODP (opracowanie dokumentacji prototypowej). Tłumaczenie dokumentacji konstrukcyjnej i wykorzystywanie jej podczas negocjacji korzystnie wpływa na dalszą współpracę z klientem niemieckim.

Czas potrzebny na wykonanie klastra C jest równy czasowi DK i ODP wynoszący 204 j.u., natomiast koszt równy jest sumie wszystkich zadań, czyli 17 380 j.u.



**Rysunek 4.6.** Analiza czynności w klastrze C

Źródło: opracowanie własne.



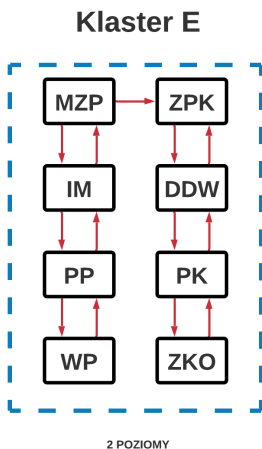
**Rysunek 4.7.** Analiza czynności w klastrze D

Źródło: opracowanie własne.

W klastrze D, przedstawionym na rysunku 4.7, wszystkie zadania wykonywane są współbieżnie. Jest to jeden wielki jednoczesny proces. Zadanie DKT (dokumentacja – karty technologiczne) wykonywane jest współbieżnie z zadaniem ODM (opracowanie drzewa materiałowego), które wykonywane jest współbieżnie z WD (wykonanie detali) oraz DZ (dział zaopatrzeniowy). DZ oprócz realizacji współbieżnej z ODM, wymienia informacje również z LK (lista kooperacji), LD (lista dostawców), ZH (zlecenie handlowe) oraz SM (stan magazynowy). SM wykonywane jest współbieżnie z ODM oraz ZP (zlecenie produkcyjne) oraz ODM. Natomiast

ZH wykonywane jest wspólnie z ZP oraz ZZP (zatwierdzenie zamówienia na prototyp).

Czas potrzebny na wykonanie klastra D jest równy czasowi najdłuższej czynności, czyli WD, która trwa 79 j.u. Koszt równy jest sumie kosztów zadań, czyli 6815 j.u.



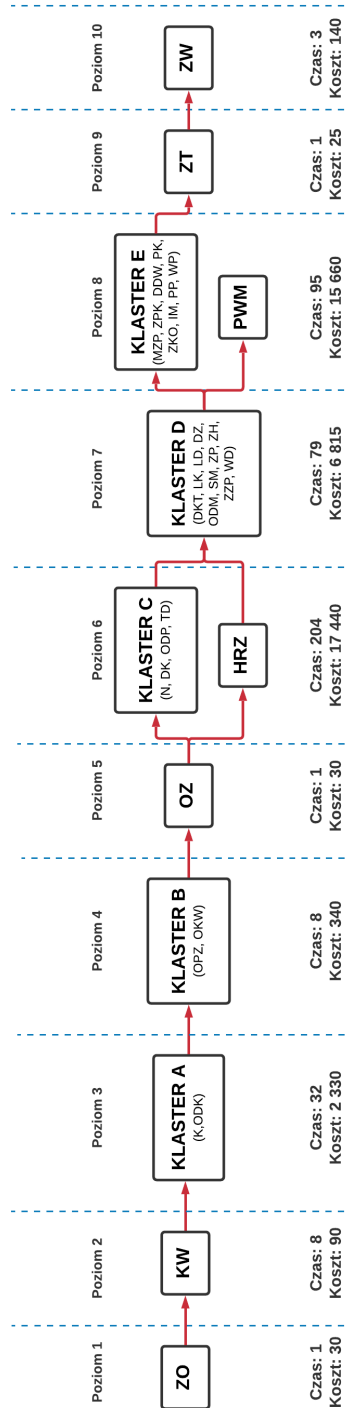
**Rysunek 4.8.** Analiza czynności w klastrze E

Źródło: opracowanie własne.

W klastrze E zadania wykonywane są na dwóch poziomach, przedstawionych na rysunku 4.8. Na pierwszym poziomie znajdują się zadania MZP, IM, PP oraz WP. Zadanie MZP (montaż zespołów i podzespołów) wykonywane jest wspólnie z zadaniem IM (instrukcja montażu), które wykonywane jest wspólnie z PP (projekt prototypu), które jest wykonywane wspólnie z WP (wykonanie prototypu). Po wykonaniu czynności na pierwszym poziomie można rozpocząć zadania na poziomie drugim. ZPK (zatwierdzenie prototypu przez klienta) wykonywane jest wspólnie z DDW (dokumentacją do wysyłki), które wykonywane jest wspólnie z PK (protokołem końcowym), które wykonywane jest wspólnie z ZKO (zebranie kierowników oddziałów).

Czas potrzebny na wykonanie klastra E jest równy czasom najdłuższych czynności z każdego poziomu, czyli czasowi WP oraz ZPK, które wynoszą w sumie 95 j.u. Koszt równy jest sumie wszystkich zadań, czyli 15 590 j.u.

Analizując dane z rysunku 4.9, możemy policzyć czas i koszt procesu produkcyjnego po szczegółowym rozpatrzeniu klastrów. Na poniższym modelu sieciowym uwzględniono koszt i czas trwania poszczególnego poziomu, gdzie w przypadku czynności równoległych do obliczeń wzięto czas najdłuższej czynności lub klastra.



Rysunek 4.9. Czasy i koszty w klastrowym, hierarchicznym modelu w realizacji zadań

Źródło: opracowanie własne.

Po przeprowadzeniu szczegółowej analizy przypadku, uwzględniając realizację współbieżną oraz równoległą, znacząco obniżono zarówno koszt, jak i czas realizacji procesu produkcyjnego, co przedstawiono w tabeli 4.2.

**Tabela 4.2.** Oszczędności czasu i kosztu

	Zoptymalizowana macierz (j.u.)	Zoptymalizowana macierz po analizie (j.u.)	Zaoszczędzono
Czas całkowity	757	426	44%
Koszt całkowity	61 389	42 900	30%
Czas sprzężeń progresywnych	542	426	21%
Koszt sprzężeń progresywnych	42 900	42 900	0%
Czas sprzężeń zwrotnych	215	0	100%
Koszt sprzężeń zwrotnych	18 489	0	100%
Liczba sprzężeń zwrotnych	21	0	100%

Źródło: opracowanie własne.

Czas całkowity po analizie macierzy po optymalizacji uległ redukcji aż o 44%, z 757 j.u. do 426 j.u., natomiast koszt całkowity zmniejszył się o 30%, z 61 389 j.u. do 42 900 j.u. Sprzężenia zwrotne nie występują, dzięki zastosowaniu realizacji współbieżnej oraz równoległej zadań.

W tabeli 4.3 zestawiono informacje na temat czasów i kosztów realizacji procesu produkcyjnego w macierzy przed optymalizacją, z macierzą zoptymalizowaną po analizie pod względem równoległości i współbieżności.

**Tabela 4.3.** Podsumowanie oszczędności czasu i kosztu

	Macierz przed optymalizacją (j.u.)	Zoptymalizowana macierz po analizie (j.u.)	Zaoszczędzono
Czas całkowity	1 433	426	70%
Koszt całkowity	118 645	42 900	64%
Czas sprzężeń progresywnych	542	426	21%
Koszt sprzężeń progresywnych	42 900	42 900	0%
Czas sprzężeń zwrotnych	891	0	100%
Koszt sprzężeń zwrotnych	75 745	0	100%
Liczba sprzężeń zwrotnych	21	0	100%

Źródło: opracowanie własne.

Czas całkowity po analizie macierzy po optymalizacji w stosunku do macierzy pierwotnej uległ redukcji aż o 70%, z 1433 j.u. do 426 j.u., natomiast koszt całkowity zmniejszył się aż o 64%, z 118 645 j.u. do 42 900 j.u.

Wdrożenie zoptymalizowanego przebiegu procesu produkcyjnego w firmie EURO-BOX sp. z o.o. jest wręcz niemożliwe. Wynika to z szeregu zdarzeń, które przedsiębiorstwo musi zagwarantować, m.in.: ciągły dostęp do zasobów ludzkich, niezawodność funkcjonalną parku maszynowego, stały dostęp do materiałów, zmienność oprzyrządowania produkcyjnego, stały nadzór nad transportem wewnątrzzakładowym oraz płynność finansową. 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%.

## 4.2. Reprezentacja przebiegu procesu produkcyjnego po optymalizacji – harmonogram Gantta, CPM

Na podstawie zoptymalizowanej macierzy DSM opracowano nową tabelę realizacji zadań. Wynika ona z zreorganizowanej kolejności wykonywania czynności w zoptymalizowanej macierzy sprzężeń. Część sprzężeń zwrotnych uległa przekształceniu na sprzężenia progresywne, co uwzględniono w tabeli 4.4 służącej do zbudowania harmonogramu Gantta oraz diagramu sieciowego.

Na podstawie danych wejściowych z tabeli 4.4, w której przedstawiono wszystkie zadania z procesu produkcyjnego, podano ich czas, koszt, datę rozpoczęcia oraz nowy obieg informacji. Po wybraniu terminu rozpoczęcia projektu program MS Project automatycznie obliczył całkowity zapas czasu oraz rozpoczęcie i zakończenie każdego zadania.

Struktura wykresu Gantta po optymalizacji jest bardziej uporządkowana i czytelna niż przed optymalizacją. Z harmonogramu Gantta (rys. 4.10) wynika, że ścieżka krytyczna obejmuje zadania: zapytanie ofertowe, kalkulację wstępną, kalkulację, ofertę dla klienta, negocjacje, dokumentację konstrukcyjną, dokumentacje – karty technologiczne, opracowanie drzewa materiałowego, wykonanie detali, montaż zespołów i podzespołów, instrukcję montażu, projekt prototypu, wykonanie prototypu. Czynności krytyczne różnią się od tych z harmonogramu przed optymalizacją. Suma zadań na ścieżce krytycznej, czyli czas trwania projektu równa się 494 j.u. Przyjmując, że jedna j.u. równa jest jednej godzinie, jeśli

projekt zacznie się 1 stycznia 2021 r., zakończy się 15 lutego 2021 r. Całkowity koszt projektu wyniesie 42 900 j.u.

Harmonogram Gantta utworzony dla układu czynności po optymalizacji uwzględnia więcej informacji na temat relacji pomiędzy zadaniami, przez co czas trwania projektu wydłużył się w stosunku do harmonogramu przed optymalizacją. Czas realizacji po optymalizacji jest bliższy rzeczywistości, lecz nadal występują ukryte połączenia (sprzężenia zwrotne) pomiędzy czynnościami, które nie są uwzględnione.

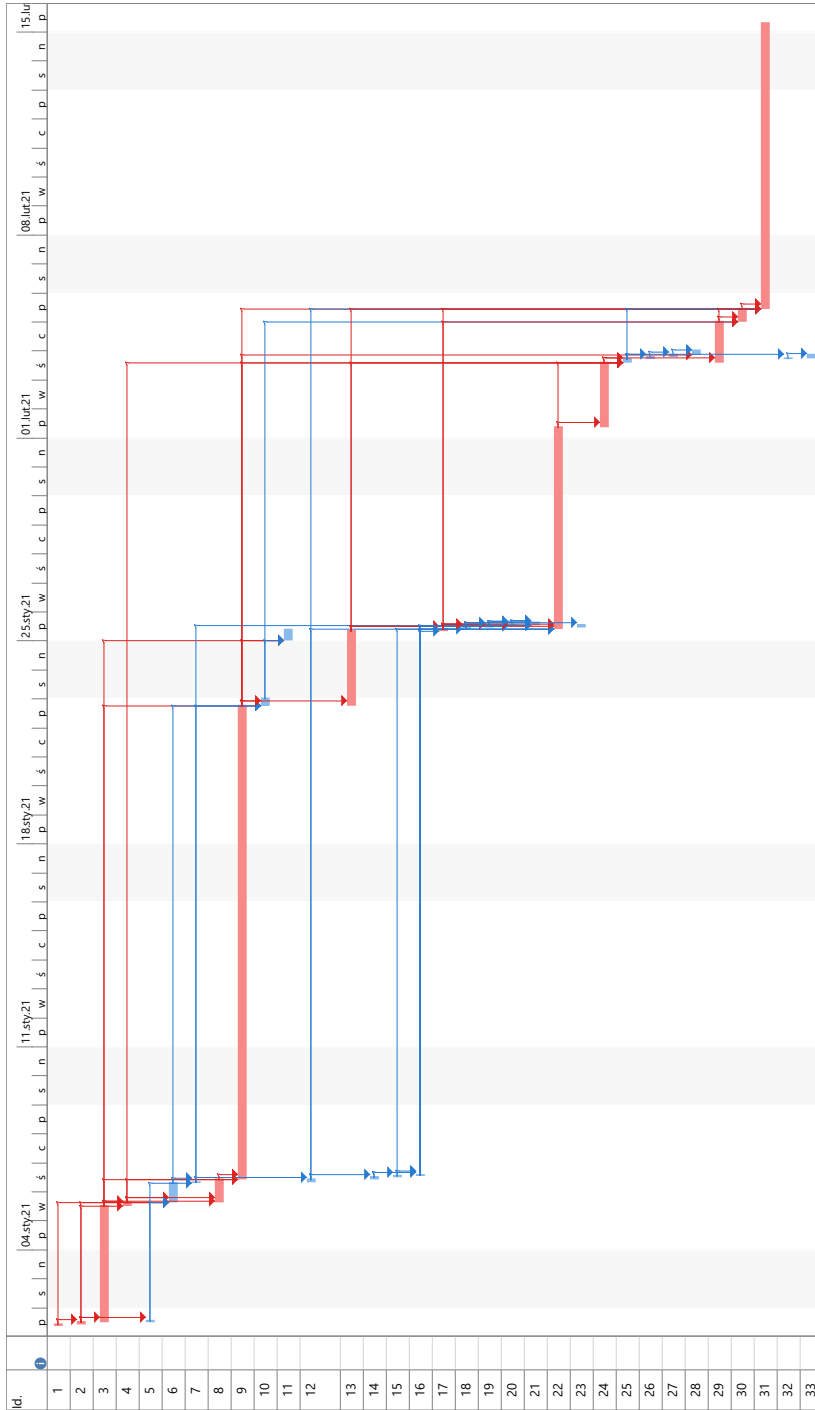
Na podstawie tych samych danych wejściowych skonstruowano diagram sieciowy (rys. 4.11).

Porównując diagram sieciowy po optymalizacji, można zauważyć, że jego struktura jest bardziej uporządkowana i czytelna niż w przypadku wykresu sieciowego przed optymalizacją.

Tabela 4.4. Dane wejściowe do programu MS Project po optymalizacji

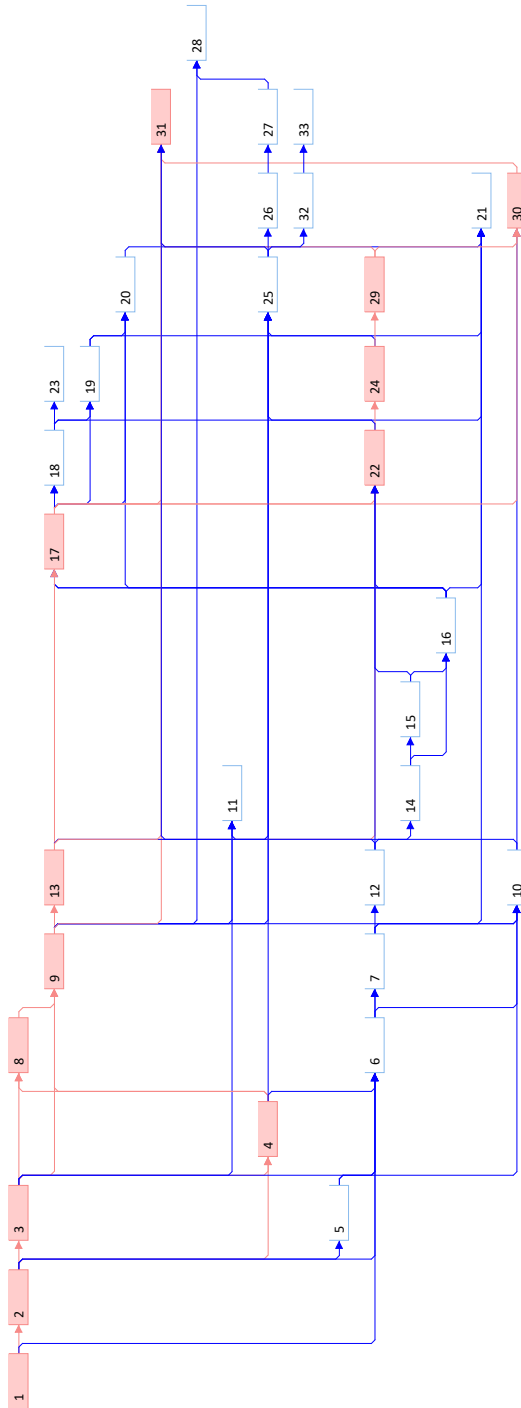
Id.	Tryb zadania	Nazwa zadania	Czas trwania	Całkowity zapas czasu	Koszt	Rozpoczęcie	Zakończenie	Poprzedniki
0	☑	<b>Podsumowanie</b>	<b>494 godz.</b>	<b>0 godz.</b>	<b>42 900,00 j.u.</b>	<b>01.01.2021</b>	<b>15.02.2021</b>	
1	☑	Zapytanie ofertowe	1 godz.	0 godz.	30,00 j.u.	01.01.2021	01.01.2021	
2	☑	Kalkulacja wstępna	2 godz.	0 godz.	90,00 j.u.	01.01.2021	01.01.2021	1
3	☑	Kalkulacja	32 godz.	0 godz.	2 240,00 j.u.	01.01.2021	05.01.2021	2
4	☑	Oferta dla klienta	3 godz.	0 godz.	90,00 j.u.	05.01.2021	05.01.2021	2;3
5	☑	Opinia Prezesa Zarządu	1 godz.	236 godz.	100,00 j.u.	01.01.2021	01.01.2021	2
6	☑	Opracowanie koncepcji wstępnej	8 godz.	202 godz.	240,00 j.u.	05.01.2021	06.01.2021	1;2;4;5
7	☑	Otwarcie zlecenia	1 godz.	202 godz.	30,00 j.u.	06.01.2021	06.01.2021	5;6
8	☑	Negocjacje	11 godz.	0 godz.	1 050,00 j.u.	05.01.2021	06.01.2021	3;4
9	☑	Dokumentacja konstrukcyjna	200 godz.	0 godz.	16 000,00 j.u.	06.01.2021	22.01.2021	3;4;8
10	☑	Opracowanie dokumentacji prototypowej	4 godz.	144 godz.	180,00 j.u.	22.01.2021	22.01.2021	3;6;7;9
11	☑	Thumaczenie dokumentacji	3 godz.	238 godz.	150,00 j.u.	25.01.2021	25.01.2021	3;9;10
12	☑	Akceptacja Harmonogramu realizacji zlecenia	2 godz.	202 godz.	60,00 j.u.	06.01.2021	06.01.2021	7
13	☑	Dokumentacja – karty technologiczne	6 godz.	0 godz.	180,00 j.u.	22.01.2021	25.01.2021	9
14	☑	Lista kooperacji	2 godz.	202 godz.	50,00 j.u.	06.01.2021	06.01.2021	12
15	☑	Lista dostawców	1 godz.	202 godz.	25,00 j.u.	06.01.2021	06.01.2021	14
16	☑	Dział Zaopatrzeniowy	1 godz.	202 godz.	20,00 j.u.	06.01.2021	06.01.2021	14;15
17	☑	Opracowanie drzewa materiałowego	2 godz.	0 godz.	60,00 j.u.	25.01.2021	25.01.2021	13;16
18	☑	Stan magazynowy	1 godz.	232 godz.	20,00 j.u.	25.01.2021	25.01.2021	16;17
19	☑	Zlecenie produkcyjne	1 godz.	232 godz.	30,00 j.u.	25.01.2021	25.01.2021	17;18
20	☑	Złedzenie handlowe	1 godz.	232 godz.	30,00 j.u.	25.01.2021	25.01.2021	16;17;19
21	☑	Zatwierdzenie zamówienia na prototyp	2 godz.	232 godz.	80,00 j.u.	25.01.2021	25.01.2021	7;16;18;19;20
22	☑	Wykonanie detali	79 godz.	0 godz.	6 320,00 j.u.	25.01.2021	01.02.2021	12;13;15;16;17
23	☑	Przekazanie wyciecznych do magazynu	2 godz.	234 godz.	70,00 j.u.	25.01.2021	25.01.2021	18
24	☑	Montaż zespołów i podzespołów	37 godz.	0 godz.	2 960,00 j.u.	01.02.2021	03.02.2021	22
25	☑	Zatwierdzenie prototypu przez klienta	3 godz.	26 godz.	90,00 j.u.	03.02.2021	03.02.2021	4;9;13;22;24
26	☑	Dokumentacja do wysyłki	2 godz.	113 godz.	60,00 j.u.	03.02.2021	03.02.2021	25
27	☑	Protokół końcowy	2 godz.	113 godz.	60,00 j.u.	03.02.2021	03.02.2021	26
28	☑	Zebrań kierowników oddziałów	1 godz.	113 godz.	60,00 j.u.	03.02.2021	03.02.2021	9;27
29	☑	Instrukcja montażu	24 godz.	0 godz.	1 680,00 j.u.	03.02.2021	04.02.2021	24
30	☑	Projekt prototypu	5 godz.	0 godz.	200,00 j.u.	05.02.2021	05.02.2021	10;17;29
31	☑	Wykonanie prototypu	92 godz.	0 godz.	10 480,00 j.u.	05.02.2021	15.02.2021	9;12;13;17;25;29;30
32	☑	Zamówienie transportu	1 godz.	114 godz.	25,00 j.u.	03.02.2021	03.02.2021	25
33	☑	Zaladunek i wysyłka	3 godz.	114 godz.	140,00 j.u.	03.02.2021	03.02.2021	32

Źródło: opracowanie własne.



**Rysunek 4.10.** Wykres Gantta zoptymalizowanego procesu produkcyjnego

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 4.1.1. Diagram sieciowy CPM zoptymalizowanego przebiegu procesu produkcyjnego

Źródło: opracowanie własne.

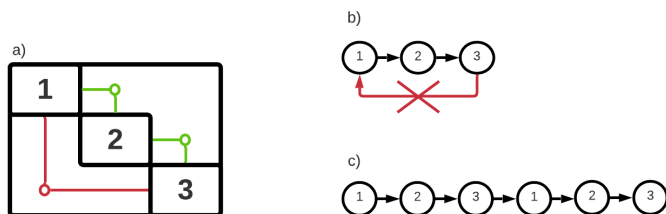
## Podsumowanie i wnioski

W bardzo trudnym czasie, jakim była pandemia COVID-19, szczególnego znaczenia nabrało poszukiwanie oszczędności we wszystkich obszarach działalności przedsiębiorstw. Jednym z kluczowych elementów pozwalających na optymalizację kosztów okazało się odpowiednie planowanie zadań – zarówno na poziomie strategicznym, jak i operacyjnym.

Błędy w planowaniu dowolnego procesu mogą prowadzić do jego niewydolności, a w konsekwencji do wydłużenia czasu realizacji i wzrostu kosztów. Dlatego tak istotne jest, aby proces planowania był przemyślany, dokładny i oparty na rzeczywistych zależnościach między zadaniami.

Tradycyjne metody planowania, takie jak harmonogramy Gantta czy wykresy sieciowe, mimo swojej popularności, mają istotne ograniczenia. Nie uwzględniają one w pełni wszystkich rzeczywistych relacji między zadaniami, zwłaszcza sprzężeń zwrotnych, które często występują w praktyce (rys. 5.1b). Może to prowadzić do zniekształcenia obrazu rzeczywistego przebiegu procesu produkcyjnego oraz niedokładnego oszacowania czasu jego trwania.

Próba zastąpienia sprzężeń zwrotnych sprzężeniami progresywnymi (rys. 5.1c) w tradycyjnych modelach powoduje konieczność powtórnego uwzględnienia tych samych zadań w harmonogramie. W efekcie cała struktura realizacji przedsięwzięcia zostaje sztucznie wydłużona.

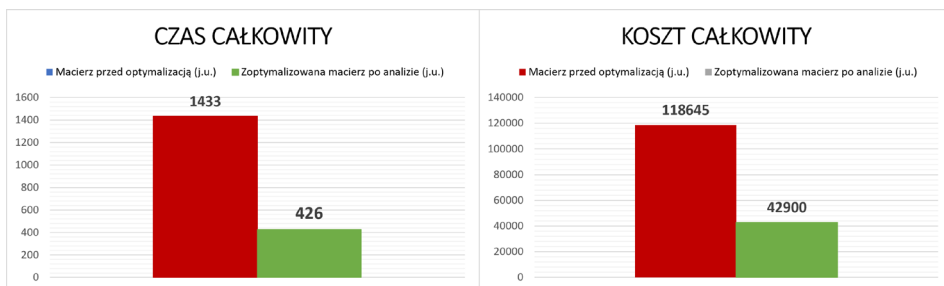


Rysunek 5.1. Różne ujęcia sprzężenia zwrotnego

Źródło: opracowanie własne.

Zaletą alternatywnego podejścia – np. w postaci macierzy – jest możliwość uwzględnienia rzeczywistych przepływów informacji oraz relacji pomiędzy zadaniami w sposób bardziej przejrzysty i dokładny (rys. 5.1a). Dzięki temu możliwe jest lepsze odwzorowanie złożoności procesów i efektywniejsze zarządzanie projektami.

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 1433 j.u. do 426 j.u., co przekłada się na oszczędność 1007 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%).



**Rysunek 5.2.** 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.

Rozwiązanie zostało opracowane z myślą o wspieraniu procesu dydaktycznego i będzie wykorzystywane w celach edukacyjnych przez studentów w kolejnych latach akademickich. Dzięki temu możliwe będzie praktyczne zastosowanie wiedzy z zakresu zarządzania projektami, planowania produkcji oraz analizy danych. System stanowi również platformę do testowania i rozwijania nowych podejść badawczo-rozwojowych w środowisku akademickim.

W przyszłości planowane jest rozszerzenie programu MAG PROJEKT poprzez wprowadzenie zaawansowanych usprawnień funkcjonalnych. Kluczowym celem jest umożliwienie bardziej szczegółowego wprowadzania danych wejściowych, co z kolei pozwoli na pełniejszą automatyzację procesów analitycznych. Zmodernizowany system ma umożliwiać ocenę równoległości i współbieżności realizacji

zadań w kontekście dostępnych zasobów i zdolności produkcyjnych przedsiębiorstwa. W rezultacie możliwe będzie dokładniejsze dopasowanie harmonogramów projektowych do realnych możliwości operacyjnych organizacji, co zwiększy efektywność zarządzania i ograniczy ryzyko opóźnień.



## Bibliografia

- [1] Browning T.R., *Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities*, IEEE Transactions on Engineering Management 2015.
- [2] Browning T.R., *Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions*, IEEE Transactions on Engineering Management 2001.
- [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] Heagney J., *Fundamentals of Project Management*, AMACOM, New York 2012.
- [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] Yassine A.A., *An Introduction to Modeling and Analyzing Complex Product Development Processes Using the Design Structure Matrix (DSM) Method*, Quaderni di Management 2004, vol. 9.
- [12] Verzuh E., *The Fast Forward MBA in Project Management*, 6<sup>th</sup> ed., Wiley, 2021.
- [13] Pinto J.K., *Project Management: Achieving Competitive Advantage*, 6<sup>th</sup> ed., Pearson Education, 2022.
- [14] Larson E.W., Gray C.F., *Project Management: The Managerial Process*, 8<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, 2021.
- [15] Lock D., *Project Management*, 11<sup>th</sup> ed., Routledge, 2020.
- [16] Kerzner H., *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, 13<sup>th</sup> ed., Wiley, 2022.
- [17] Schwalbe K., *Information Technology Project Management*, 10<sup>th</sup> ed., Cengage Learning, 2023.

- [18] Kielec R., Jędrzejewska A., Kaźmierczak P., *Inżynieria współbieżna w przebiegu procesu produkcyjnego w wybranym przedsiębiorstwie*. W: Inżynieria produkcji. Badania w inżynierii mechanicznej, vol. 20, red. J. Patalas-Maliszewska, J. Jakubowski, Wydaw. Naukowe Instytutu Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2023.
- [19] Kielec R., Szaśiadek M., *Macierzowa metoda planowania przedsięwzięć technicznych w budowie maszyn*, Technologia i Automatyzacja Montażu 2018, nr 2.
- [20] Szaśiadek M., Kielec R., Woźniak W., *The Application of the Dependency Structure Matrix in the Planning of Production Processes*. W: 34<sup>th</sup> International-Business-Information-Management-Association Conference – IBIMA 2019: VISION 2025: Education excellence and management of innovations through sustainable economic competitive advantage (#), Madrid, Hiszpania, Norristown: International Business Information Management Association (IBIMA), 2019.
- [21] Kielec R., Szaśiadek M., Woźniak W., *Adoption of the Evolutionary Algorithm to Automate the Scheduling of the Production Processes*. W: Proceedings of the 31, International Business Information Management Association Conference – IBIMA: Innovation Management and Education Excellence through Vision 2020 (#), Milan, Włochy, Norristown: International Business Information Management Association (IBIMA), 2018.
- [22] Kielec R., Bac M., *Algorytmy genetyczne w optymalizacji procesów projektowo-konstrukcyjnych*. W: Inżynieria produkcji: bliżej praktyki, t. 10, red. J. Jakubowski, J. Patalas-Maliszewska, S. Kłós, Instytut Informatyki i Zarządzania Produkcją Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2016.
- [23] Wewnętrzna dokumentacja firmy EURO-BOX sp. z o.o.
- [24] <https://dsmweb.org/sequencing-a-dsm/> (data dostępu: 10.04.2021).
- [25] <https://www.eurobox.pl/produkty.html> (data dostępu: 10.04.2021).

## Spis tabel

<b>Tabela 1.1.</b> Czynności, sprzężenia oraz czas trwania zadań .....	9
<b>Tabela 1.2.</b> Dane wejściowe hipotetycznego procesu produkcyjnego .....	12
<b>Tabela 2.1.</b> Czasy, koszty oraz sprzężenia tryzadaniowego przedsięwzięcia .....	20
<b>Tabela 3.1.</b> Sekwencja realizacji produkcji dla wybranego produktu .....	25
<b>Tabela 3.2.</b> Czas, koszty oraz sprzężenia zwrotne procesu produkcyjnego przed optymalizacją .....	28
<b>Tabela 3.3.</b> Dane wejściowe do programu MS Project przed optymalizacją .....	29
<b>Tabela 4.1.</b> Czas, koszty oraz sprzężenia zwrotne procesu produkcyjnego po optymalizacji .....	36
<b>Tabela 4.2.</b> Oszczędności czasu i kosztu .....	42
<b>Tabela 4.3.</b> Podsumowanie oszczędności czasu i kosztu .....	42
<b>Tabela 4.4.</b> Dane wejściowe do programu MS Project po optymalizacji .....	44



## Spis rysunków

Rysunek 1.1. Diagram sieciowy .....	8
Rysunek 1.2. Diagram sieciowy AoA .....	9
Rysunek 1.3. Diagram sieciowy metodą AoN .....	10
Rysunek 1.4. Harmonogram Gantta dla opracowanego przykładu .....	13
Rysunek 2.1. Kwadratowa macierz sprzężeń .....	17
Rysunek 2.2. Przykład metody sieciowej z uwzględnieniem sprzężeń zwrotnych .....	17
Rysunek 2.3. Przykłady realizacji sekwencyjnej – model sieciowy oraz DSM .....	18
Rysunek 2.4. Przykłady realizacji równoległej – model sieciowy oraz DSM .....	18
Rysunek 2.5. Przykłady realizacji współbieżnej – model sieciowy oraz DSM .....	19
Rysunek 2.6. Warianty rozwiązań dla trzyczadaniowej macierzy .....	21
Rysunek 3.1. Obudowa części elektrycznych .....	24
Rysunek 3.2. Macierz sprzężeń przed optymalizacją .....	26
Rysunek 3.3. Klastry w macierzy sprzężeń przed optymalizacją .....	27
Rysunek 3.4. Hierarchiczny model w realizacji zadań z uwzględnieniem klastrów .....	28
Rysunek 3.5. Harmonogram Gantta oryginalnego przebiegu procesu produkcyjnego .....	30
Rysunek 3.6. Diagram sieciowy CPM oryginalnego przebiegu procesu produkcyjnego .....	32
Rysunek 4.1. Macierz sprzężeń po optymalizacji .....	34
Rysunek 4.2. Klastry w macierzy sprzężeń po optymalizacji .....	35
Rysunek 4.3. Hierarchiczny model w realizacji zadań z uwzględnieniem klastrów .....	37
Rysunek 4.4. Analiza czynności w klastrze A .....	38
Rysunek 4.5. Analiza czynności w klastrze B .....	38
Rysunek 4.6. Analiza czynności w klastrze C .....	39
Rysunek 4.7. Analiza czynności w klastrze D .....	39

<b>Rysunek 4.8.</b> Analiza czynności w klastrze E .....	40
<b>Rysunek 4.9.</b> Czasy i koszty w klastrowym, hierarchicznym modelu w realizacji zadań .....	41
<b>Rysunek 4.10.</b> Wykres Gantta zoptymalizowanego procesu produkcyjnego .....	45
<b>Rysunek 4.11.</b> Diagram sieciowy CPM zoptymalizowanego przebiegu procesu produkcyjnego .....	46
<b>Rysunek 5.1.</b> Różne ujęcia sprzężenia zwrotnego .....	47
<b>Rysunek 5.2.</b> Porównanie czasu i kosztu dla macierzy przed analizą i po analizie .....	48

## Streszczenie

W podręczniku dla studentów Uniwersytetu Zielonogórskiego przedstawiono analizę rzeczywistego procesu produkcyjnego skrzynki elektrycznej w przedsiębiorstwie EURO-BOX sp. z o.o. oraz przybliżono zagadnienia teoretyczne dotyczące harmonogramu Gantta, metody CPM oraz macierzy sprzężeń (DSM). Za pomocą ww. metod przedstawiono przebieg wytwarzania produktu na podstawie danych wejściowych. Następnie zoptymalizowano proces produkcyjny, posługując się macierzą sprzężeń, którą w następnej kolejności poddano szczegółowej analizie. Przy pomocy nowego, optymalnego układu zadań zbudowano nowy harmonogram Gantta oraz diagram sieciowy.

Dzięki optymalizacji postaci rzeczywistego procesu produkcyjnego za pomocą macierzy sprzężeń otrzymano istotnie zredukowany czas i koszt wytworzenia skrzynki elektrycznej.



# Spis treści

<b>Wstęp</b> .....	5
<b>1. Metody harmonogramowania produkcji – zagadnienia teoretyczne</b> .....	7
1.1. Diagram sieciowy CPM .....	7
1.2. Geneza klasycznej metody harmonogramowania produkcji – Gantt .....	11
<b>2. Metoda zarządzania produkcją – Design Structure Matrix</b> .....	15
2.1. Charakterystyka metody DSM .....	15
2.2. Określenie funkcji celu macierzy sprzężeń za pomocą metody sekwencjonowania wykorzystującej permutacje .....	19
<b>3. Zastosowanie macierzy sprzężeń na rzeczywistym przykładzie firmy     EURO-BOX sp. z o.o.</b> .....	23
3.1. Reprezentacja przebiegu procesu produkcyjnego w firmie EURO-BOX sp. z o.o. przy pomocy DSM .....	23
3.2. Reprezentacja przebiegu procesu produkcyjnego w wybranym przedsiębiorstwie – harmonogram Gantta, CPM .....	29
<b>4. Analiza przebiegu procesu produkcyjnego po optymalizacji</b> .....	33
4.1. Reprezentacja przebiegu procesu produkcyjnego po optymalizacji za pomocą macierzy sprzężeń .....	33
4.2. Reprezentacja przebiegu procesu produkcyjnego po optymalizacji – harmonogram Gantta, CPM .....	43
<b>Podsumowanie i wnioski</b> .....	47
<b>Bibliografia</b> .....	51
<b>Spis tabel</b> .....	53
<b>Spis rysunków</b> .....	55
<b>Streszczenie</b> .....	57



Podręcznik autorstwa prof. Romana Kieleca stanowi wyważone połączenie teorii i praktyki z zakresu zarządzania produkcją. W czasach, gdy przemysł wymaga coraz bardziej elastycznych i technologicznie zaawansowanych narzędzi do planowania procesów, praca ta jest nie tylko aktualna, ale również wyjątkowo potrzebna w dydaktyce i praktyce inżynierskiej. Zawarte w niej treści wpisują się w główny nurt rozwoju nowoczesnych metod organizacji pracy produkcyjnej i zarządzania projektami. [...] Wyróżniającym się aspektem publikacji jest podejście do metodyki DSM, która w tym przypadku nie tylko została opisana, ale również skutecznie wdrożona w analizie przemysłowej. Autor wyraźnie eksponuje korzyści wynikające z minimalizacji sprzężeń zwrotnych oraz sekwencjonowania zadań, co przekłada się na realne oszczędności czasowe i kosztowe. Tego rodzaju podejście wskazuje na duże doświadczenie autora w pracy badawczej i doradczej na styku nauki i przemysłu.

*Z recenzji wydawniczej dr hab. inż. Milana Edla  
z Uniwersytetu Zachodniopolskiego w Pilźnie*



UNIWERSYTET  
ZIELONOGÓRSKI

ISBN 978-83-7842-594-6