

WYKORZYSTANIE METODY CPM DO WYZNACZANIA CZASU ROZPOCZĘCIA PRODUKCJI URZĄDZEŃ CHŁODNICZYCH

Bożena ZWOLIŃSKA, Małgorzata WERBIŃSKA

Streszczenie: W artykule zaprezentowane zostało wykorzystanie metody CPM (ang. *Critical Path Method*) do wyznaczenia czasu rozpoczęcia produkcji urządzeń chłodniczych wykorzystywanych w medycynie. Celem było określenie zadań determinujących rozpoczęcie procesów produkcji w konwergentnym układzie wytórczym. W analizowanym układzie wykorzystano teorię systemów złożonych i dokonano kilkustopniowej dekompozycji na pojedyncze strumienie wytórcze. W artykule została również przedstawiona funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu przejścia (produkcji) wyznaczonych odpowiednio: ścieżki krytycznej korpusu i drzwi. Określona wartość oczekiwana z wyznaczonej funkcji gęstości determinuje minimalny czas rozpoczęcia zadań dla poszczególnych strumieni.

Słowa kluczowe: Critical Path Method, Lean Production, harmonogramowanie

1. Wprowadzenie

W przedsiębiorstwach produkcyjnych menedżerowie nieustannie poszukują nowych możliwości zwiększania zysków. Obecnie na rynku istnieje duża konkurencja, nie tylko w wydzielonych segmentach ale również pomiędzy firmami różnych branż. Nieustająca „walka” o klienta wymusza na organizacjach racjonalizacji kosztów wynikających z realizacji procesów głównych oraz pomocniczych. Działaniami zmierzającymi do zwiększenia zysków mogą być: 1) zwiększenie ceny dystrybuowanego wyrobu lub 2) ograniczenie kosztów jego wytworzenia. Zastosowanie narzędzi *lean production* jest zespołem przedsięwzięć mających na celu minimalizację występującego marnotrawstwa *muri*, *mura* oraz *muda* tzw. 3M. Straty typu *muri* związane są z przeciążeniem pracowników, maszyn lub całych systemów [1]. Marnotrawstwo typu *mura* dotyczy strat wynikających ze zmienności i braku powtarzalności procesów jak również wyrobów. Natomiast *muda* są to wszystkie działania wymagające nakładów pracy a nie tworzące wartości dodanej tzw. VA – Value Added [1, 3, 8]. Praktycy klasyfikują *muda* na dwa typy:

- *muda* pierwszego rzędu: to czynności, które nie stanowią wartości dla odbiorcy, natomiast są niezbędne i niemożliwe do wyeliminowania przez producenta, np. transport, magazynowanie itp.,
- *muda* drugiego rzędu: to czynności, które są konieczne do wyeliminowania ponieważ nie dodają wartości ani klientowi ani przedsiębiorcy, np. nadprodukcja, zbędne zapasy, nadmierne obrabianie części, czekanie itp..

Eliminacja marnotrawstwa 3M to niższe koszty produkcyjne, elastyczność systemu wytórczego oraz stabilność i powtarzalność procesów [2] – te wszystkie czynniki decydują o poziomie konkurencyjności przedsiębiorstwa na rynku. Zarządzanie przedsiębiorstwem według koncepcji *lean* jest ciągłym procesem doskonalenia (jap. *Kaizen*) w strukturze organizacyjnej i procesowej [6]. Ideą szczerpłego podejścia zgodnie z *lean* jest zamiana marnotrawstwa w wartość [4, 5, 7]. Takie działania stanowią trudność ponieważ

przedsiębiorstwo jest systemem złożonym osadzonym w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu [13]. Ponadto struktura przedsiębiorstwa to zbiór poszczególnych elementów (działów), które najczęściej nie są względem siebie doskonale dopasowane [14].

W artykule zostały zaprezentowane rozważania eliminacji strat wynikających z czasów oczekiwania (występujących w procesie montażu końcowego), na komponenty (półprodukty) wytwarzane wewnątrz przedsiębiorstwa, dla produkcji typu MTO (ang. *Make to order*). Rozważaniom został poddany konwergentny system wytwórczy, tj. taki w którym w złożonym układzie w wyniku kilku stopni przetwarzania n półproduktów i surowców wejściowych powstaje jeden wyrób finalny. Trudnością w rozważaniach stanowi duża customizacja wyrobów finalnych, która wymusza produkcję w systemie MTO (ang. *make-to-order*). Duża dynamika zmian stanów systemu, determinowana jest również przez restrykcyjne wymagania jakościowe. W pierwszym etapie wydzielono dwa główne strumienie (produkcja drzwi i produkcja korpusu). Każdy z odosobnionych i wydzielonych strumieni wytwórczych stanowił w rozważaniach podsystem złożony, w którym występowała koniunkcja podrzędnych podstrumieni. Implementacja zaprezentowanej metody umożliwi przedsiębiorstwu minimalizację marnotrawstwa (jap. *muda*) wynikającego z czekania zarówno operatora na półprodukty jak również czekania podzespołu na kolejne przetworzenie.

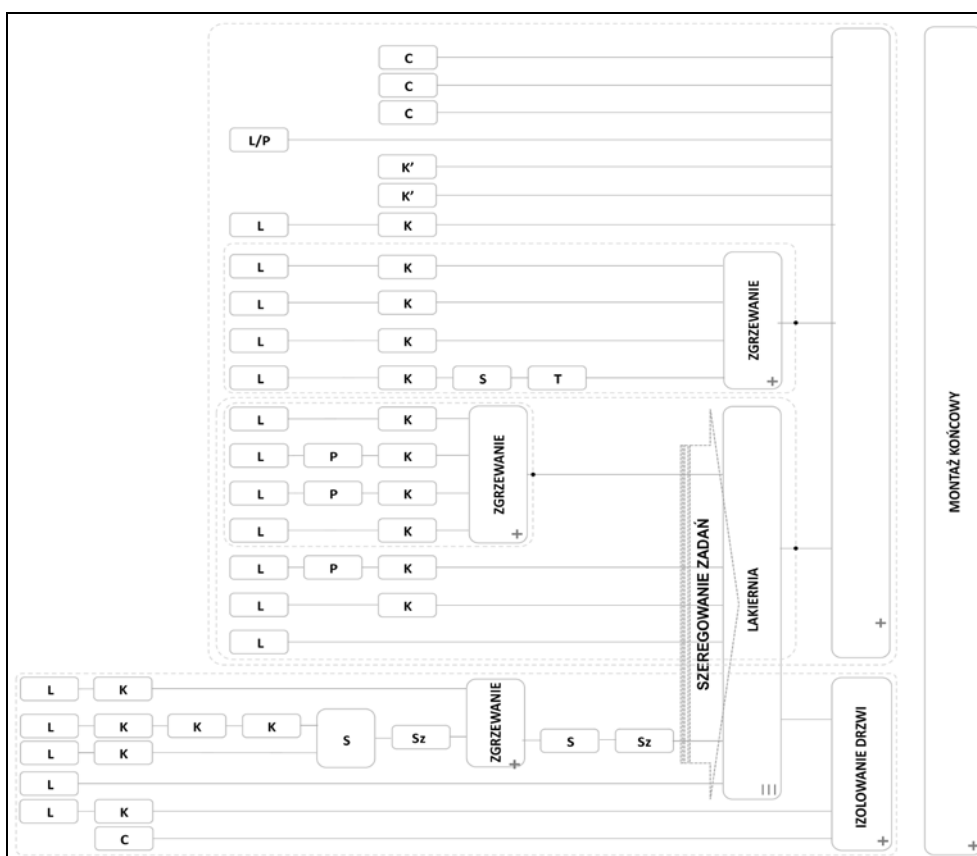
2. Charakterystyka systemu produkcyjnego

Przedmiotem rozważań jest przedsiębiorstwo produkcyjne sektora MSP (Małe Średnie Przedsiębiorstwa), zatrudniające około 200 pracowników operacyjnych realizujących cele główne firmy – produkcję urządzeń chłodniczych. Ponadto w zakładzie zatrudnionych jest około 50 osób realizujących procesy wspomagające produkcję (np.: zaopatrzenie, dystrybucję, księgowość i inne) w tym ok. 15 osób to menedżerowie różnych szczebli. Produkty firmy trafiają do klientów całego świata. Głównymi odbiorcami są sieci supermarketów rynków państw europejskich takich jak: niemieckich, angielskich, rosyjskich i inne. Ponadto firma wytwarza koncesjonowane urządzenia na rynki skandynawskie. Szeroki wachlarz wyrobów finalnych dostosowywanych do indywidualnych oczekiwań klientów jest głównym czynnikiem braku powtarzalności potoków produkcyjnych. Duża customizacja i niski wskaźnik EPEI (ang. *Every Product Every Interval*) wymusza dużą dynamikę zmian stanów systemu produkcyjnego. Brak standaryzacji komponentów składowych wytwarzanych urządzeń przy braku powtarzalności zamówień jest podstawowym czynnikiem generującym straty w firmie.

Szczegółowej analizie został poddany strumień wytwórczy urządzeń koncesjonowanych. Pomimo, iż ilościowo nie stanowią one głównej grupy sprzedawanych wyrobów to pod względem wartości kosztów, nakładów i zysków jest to priorytetowa grupa. Urządzenia koncesjonowane to szafy chłodnicze wykorzystywane w punktach medycznych w celu przechowywania krwi, preparatów krwiopochodnych, osocza oraz krioprecypitatu. Analizowane przedsiębiorstwo, ma podpisany kilkuletni kontrakt z wyłącznym dystrybutorem urządzeń chłodniczych do skandynawskich szpitali. Wymagania pod względem jakości, niezawodności i estetyki wykonania dla tej grupy produktów są bardzo restrykcyjne. Każda niezgodność z wymaganiami odbiorcy dyskwalifikuje produkt jako pełnowartościowy, który podlega jedynie utylizacji na koszt producenta. Warunki te wymuszają na producencie perfekcję w obszarze jakości produktu, jakości procesu i jakości wykonania. Każdy najmniejszy błąd i niezgodność z wymaganiami odbiorcy generuje koszty: nakładów pracy, materiałów i utylizacji.

2.1. Ujęcie procesowe rozważanego układu

Rozpatrywane urządzenia chłodnicze w zależności od modelu, składają się z około 160 – 180 sztuk różnych elementów. Około 35 – 40 % stanowią komponenty zamawiane z zewnątrz. Pozostałe elementy to półprodukty wytwarzane w zakładzie – średnio to około 115 – 120 sztuk różnego rodzaju pozycji ze struktury BOM (ang. *Bill of Materials*). Każdy półprodukt posiada własną (indywidualną) ścieżkę przejścia. W tak złożonym układzie podejście teorii systemów umożliwia analizę strumieni przepływów. Cały proces produkcyjny analizowanego wyrobu, to złożony układ z kilku hierarchicznych podprocesów składowych. Dekompozycja struktury BOM na wydzielone pojedyncze strumienie oraz przypisanie każdemu z nich wagi, będących rangą ważności umożliwia wyznaczenie tzw. *lead time'u*, czyli czasu potrzebnego na wytworzenie wyrobu finalnego. Po wykonaniu chronometraży rzeczywistych czasów przejścia dla każdego półproduktu a następnie przypisaniu najwyższej wagi dla ścieżki najdłuższej a najniższej dla najkrótszej, gdzie kryterium oceny był sumaryczny czas wykonania następujących po sobie operacji, wydzielono dwa główne strumienie przejścia tj.: wytworzenie korpusu oraz wytwarzanie drzwi. Rysunek 1 prezentuje schemat przepływu analizowanego układu w ujęciu procesowym dla strumieni wytwarzania głównych półproduktów (korpus i drzwi).



Rys. 1. Schemat procesowy rozpatrywanego układu

Struktura systemu produkcyjnego składa się z sześciu działów: Mechanicznego, Lakierni, Izolowania, Chłodniczego, Elektrycznego oraz Działu Montażu.

W obszarze Działu Mechanicznego wykonywane są następujące procesy: wykrawania laserowego, wykrawania młoteczkowego, gratowania, krawędziowania, zgrzewania, spawania, szlifowania oraz trawienia. Sporadycznie w szczególnych przypadkach odbywa się malowanie trudnodostępnych naroży wytwarzanego wyrobu, tylko w sytuacji gdy wystąpiła ingerencja w strukturę materiału, tak aby w czasie eksploatacji zapobiec wystąpieniu korozji. Proces malowania nie jest tożsamy z procesem lakierowania, który odbywa się w Dziale Lakierni. Podstawowym strumieniem wejściowym do Działu Mechanicznego są surowce: blachy (tabeli 1) oraz profile (tabeli 2) dostarczane są również produkty pomocnicze, konieczne do wykonywania procesów np. drut spawalniczy bądź tarcze ściernie i inne.

Tab. 1. Przykładowe rodzaje blach wykorzystywane w produkcji dla rozważanego przykładu

Lp.	Rodzaj blachy	Indeks wew.	Wymiary [mm]	
1	Blacha ocynkowana ogniowo	10101002	0,5x1250x2000	Z275
2	Blacha ocynkowana ogniowo	10101004	2,0x1000x1150	Z100MCB
3	Blacha ocynk. elektrolitycznie	10201006	1,0x1250x2000	b. d.
4	Blacha ocynk. elektrolitycznie	10201013	1,5x1000x2000	b. d.
5	Blacha nierdzewna – H17 (lustro)	10014001	0,5x1250x1100	1.4509
6	Blacha nierdzewna – H18 (szlif)	10015014	1,5x1250x2500	1.4307
7	Blacha nierdzewna – H18 (len)	10015001	0,8x1250x755	1.4307
8	Blacha lakierowana REAL 3000	10023000	0,8x1250x1100	b. d.
9	Blacha lakierowana REAL 9016	10029016	0,5x1151x1100	b. d.

Tab. 2. Przykładowe rodzaje profili oraz uszczelki wykorzystywane w produkcji dla rozważanego przykładu

Lp.	Nazwa komponentu	Indeks wew.	Materiał
1	Profil D – korpus krótki	20003001	PCV
2	Profil D – korpus długi	20003002	PCV
3	Rura zaworu dekompozycyjnego ϕ 15x1	20016012	Cu – DHP
4	Profil kątowy – krótki 15x10x2	20007001	Al
5	Profil kątowy – długi 40x25x2	20007002	Al
6	Ceownik 15x13x450	20005004	Al
7	Profil uszczelki 638x1571	20090035	Plastyfikowane PCV

W Dziale Lakierni procesy wykonywane są kompleksowo w automatycznej linii ESB Wagner. Pierwszym procesem jest odtłuszczenie powierzchni lakierowanej poprzez dwustopniową kąpiel: pierwsze w roztworze krzemianu sodu ($\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si}$) w kolejnym etapie następuje płukanie roztworem wody destylowanej (H_2O). Po procesie odtłuszczenia kolejno jest osuszanie, następnie pokrycie lakierowanego elementu powłoką proszku. Ostatnią fazą lakierowania proszkowego jest etap spiekania, w którym następuje scalenie struktury powłoki lakierniczej. Pomimo, iż sumaryczny czas wykonania (równy ok. 45 min) dla wszystkich etapów w procesie lakierowania jest najdłuższy w całej strukturze wytwórczej a ponadto Dział Lakierni wykonuje procesy dla podzespołów do wszystkich typów urządzeń, nie stanowi on „wąskiego gardła” w strumieniu wartości.

Dział Izolowania w rozpatrywanym przedsiębiorstwie posiada dziewięć stanowisk, w których wykonywany jest proces izolowania korpusów oraz drzwi. Proces izolowania polega na wypełnieniu pianką poliuretanową w celu zapewnienia izolacji termicznej. Potocznie proces ten nazywany jest również piankowaniem. Proces izolowania jest przedostatnim procesem w strumieniu wytwórczym. Wymaga on dużej dokładności i staranności wykonania ponieważ koszty wynikające z błędów wygenerowanych na tym etapie są jednymi z najwyższych kosztów jakościowych w przedsiębiorstwie.

Dział Chłodniczy i Dział Elektryczny są osobnymi jednostkami, w których następuje odpowiednio przygotowanie układów chłodzenia i układów sterowania elektrycznego. Skomponowane i przygotowane układy (osobno chłodnicze i elektryczne) dostarczane są jako składowe moduły urządzeń do procesu montażu końcowego. Rozpatrując cały proces produkcji jako odosobniony układ wytwórczy i dokonując dekompozycji na podsystemy, wówczas procesy realizowane w Dziale Chłodniczym i Elektrycznym są procesami, z których wyroby zasilają główny proces produkcyjny. Taktowanie zadań (procesów) w obydwóch działach musi być bezpośrednio skorelowane z etapami montażu końcowego.

Dział Montażu w rozpatrywanym przedsiębiorstwie podzielony jest na siedem stref montażowych. Każda strefa odpowiedzialna jest za realizację jednego typu urządzenia. Np. wyróżnić można osobne linie montażu: lad oraz regałów chłodniczych, wysp chłodniczych i mroźniczych, linię montażu urządzeń cukierniczych oraz inne. W ramach artykułu rozpatrywana jest linia montażu urządzeń medycznych.

Wykonując chronometraż poszczególnych faz montażu urządzeń wykorzystywanych w medycynie, wyróżnić można cztery osobne etapy montażu (rys.2).

Pierwszy etap dotyczy zadań związanych z montażem podzespołów i elementów zewnętrznych w korpusie urządzenia – strumień 1, rys. 1. Na tym etapie konieczne jest terminowe zasilenie komponentami zamawianymi z zewnątrz, np.: zawór dekompresyjny, koła jezdne, zawiasy drzwi wewnętrznych i zewnętrznych. W tym etapie dostarczanych jest około 15 różnych komponentów. Suma czasów pojedynczych operacji pierwszego etapu montażu wynosi około 80 – 100 minut.

Drugi etap to potocznie nazywane „parownikowanie”. W tym etapie następuje montaż przygotowanego modułu z Działu Chłodniczego. Czas trwania wszystkich operacji etapu drugiego wynosi około 15 – 25 minut.

Trzeci etap to montaż kompletu drzwi wewnętrznych (5 sztuk) i drzwi zewnętrznych (1 szt.). Czas trwania trzeciego etapu wynosi około 30 – 40 minut. Głównym strumieniem zasilającym ten etap jest strumień nr 2, rysunek 1 – strumień produkcji drzwi. Ponadto materiałami wejściowymi są również komponenty zamawiane z zewnątrz.

Czwarty etap to montaż układów sterowania elektrycznego. Zadania wykonywane w tym etapie zaliczane są do procesu montażu końcowego, jednak są one realizowane w wydzielonej strefie Działu Elektrycznego. Suma czasu trwania wszystkich prac wynosi około 40 – 50 minut. Rys. 2 przedstawia schemat czasów poszczególnych etapów montażu.

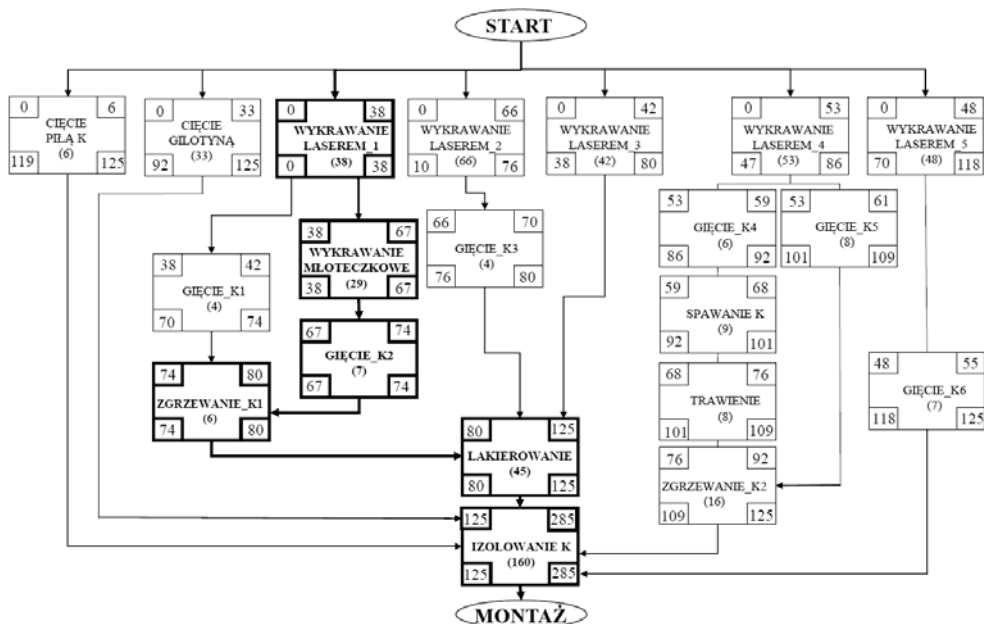
Minimalny czas realizacji zadań poszczególnych faz procesu montażu	Etap 1 80 min.	Etap 2 15 min.	Etap 3 30 min.	Etap 4 40 min.	
Maksymalny czas realizacji zadań poszczególnych faz procesu montażu	Etap 1 100 min.	Etap 2 25 min.	Etap 3 40 min.	Etap 4 50 min.	
	$t_{min}=165 \text{ min.}$				
	$t_{max}=215 \text{ min.}$				

Rys. 2. Etapy oraz min. i maks. czasy trwania montażu końcowego

2.2. Critical Path Method – studium przypadku

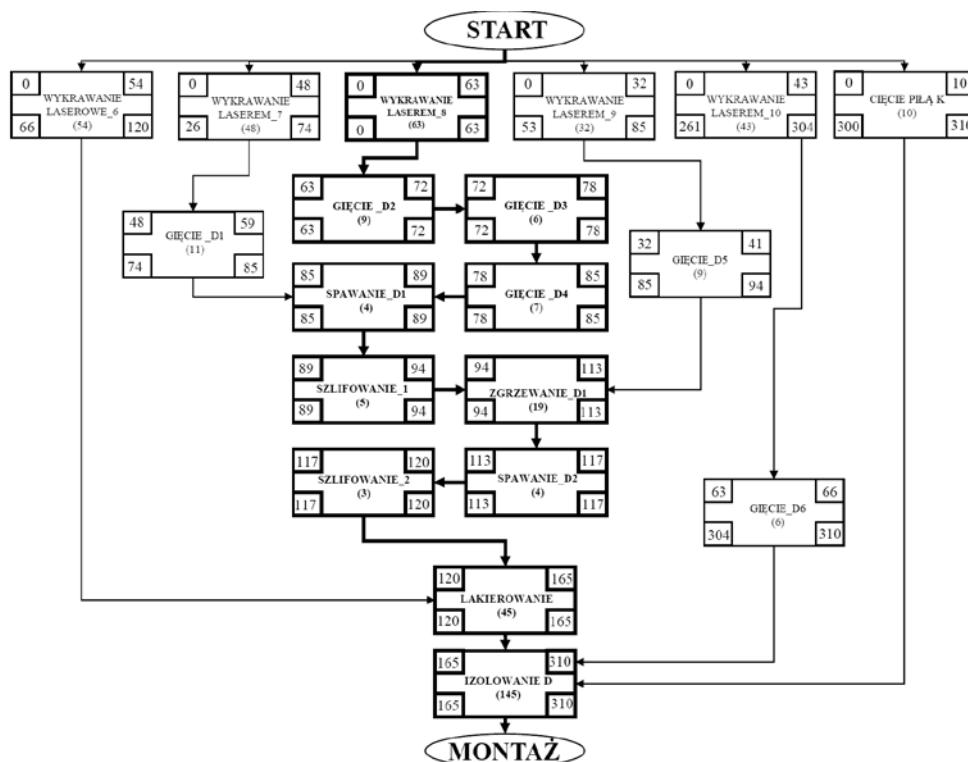
Najbardziej znane algorytmy programowania sieciowego to CPM – (ang. *Critical Path Method*) oraz PERT (ang. *Program Evaluation and Review Technique*). Obydwie metody stosowane są jako narzędzia planowania przedsięwzięć. Zarówno CPM jak również w PERT służy do określania czasu realizacji projektu (ewentualnie jego części) oraz określania momentów rozpoczęcia lub zakończenia elementarnych (cząstkowych) zadań. W ramach artykułu zastosowano metodę *Critical Path Method* do wyznaczenia sumarycznego czasu realizacji zadań produkcyjnych dla korpusu i drzwi, które stanowią główne elementy składowe urządzenia chłodniczego typu ULX.

Obecnie w rozpatrywanym zakładzie realizacja zadań w poszczególnych działach odbywa się bez harmonogramowania poszczególnych ścieżek. Proces krawędziowania zostaje wykonany, jeśli zakończy się produkcja wszystkich elementów w procesie wykrawania laserowego. Po wykonaniu wszystkich elementów w procesie krawędziowania następuje przekazanie półproduktów do kolejnych procesów. Najczęściej żaden proces nie rozpoczyna się bez otrzymania kompletu półproduktów. Taka sytuacja determinuje rozpoczęcie zlecenia produkcyjnego około dwóch tygodni przed planowaną wysyłką. Z analizy chronometraży poszczególnych etapów wynika, że czas konieczny na produkcję to około 475 min. (± 25 min.). Z rysunku 1 wynika, że zarówno strumień 1 oraz 2 mogą odbywać się niezależnie. Ważnymi kontrolnymi punktami są procesy zgrzewania oraz izolowania. W momencie rozpoczęcia tych procesów konieczne jest dostarczenie wszystkich składowych dla tego procesu komponentów. Dlatego posłużono się metodą CPM do wyznaczenia maksymalnego czasu koniecznego na realizację zadań produkcji dwóch głównych strumieni. Rysunek 3 przedstawia schemat CPM dla korpusu.



Rys. 3. Schemat CPM dla korpusu

W analizowanej ścieżce krytycznej dla korpusu i dla drzwi założono, że procesy: cięcie piłą, cięcie gilotyną oraz wykrawanie laserowe są procesami początkowymi i każdy z nich rozpoczyna się w czasie $t=0$. Założenie to wynika z faktu, iż głównym celem jest wyznaczenie maksymalnego czasu koniecznego na realizację zadań związanych z wytworzeniem produktów zasilających montaż. Czasy trwania wykrawania laserowego zależne są od: rodzaju zastosowanej blachy, kształtu wykrawanych elementów, liczby półproduktów otrzymanych z jednego procesu („wykrawania”). Rozpoczęcie procesu następnego determinowane jest czasem zakończenia procesu poprzedniego tego samego strumienia wartości. Dlatego w układach konwergentnych czas realizacji poszczególnych strumieni jest różny. W przypadku korpusu suma czasów realizacji do przedostatniego procesu wynosi odpowiednio: 6, 33, 55, 92 i 125 [min.]. Ostatnim procesem jest izolowanie, które jest procesem „sumującym” tzn. takim, w którym występuje połączenie pięciu różnych strumieni. Zjawisko „sumowania” różnych strumieni takie nazywane jest koniunkcją. Jeżeli występują różnice w czasach przejść pomiędzy poszczególnymi strumieniami to w efekcie otrzymujemy „rezerwy czasów” w każdym pojedynczym przepływie. Względnie duże wartości wynikające z różnicy czasów wykonania ostatniego i przedostatniego czasu procesu, mogą świadczyć o występującym *muda* w postaci czekania półproduktu na przetworzenie. W przypadku produkcji korpusu koniunkcją są również procesy zgrzewania z najwcześniejszym czasem rozpoczęcia w 74 [min.] oraz proces izolowania z czasem rozpoczęcia w 125 [min.]. Dla wydzielonego strumienia produkcji drzwi w identyczny sposób co dla korpusu została wykonana analiza ścieżki krytycznej – rysunek 4.



Rys. 4. Schemat CPM – dla drzwi

Procesy wytworzenia drzwi podobnie jak korpusu są układem hierarchicznym posiadającym koniunkcję w procesie spawania_1, izolowania i zgrzewania. Suma deterministycznych czasów poszczególnych etapów przetwarzania dla drzwi wynosi 310 minut. Najdłuższy zapas czasu występuje w procesie cięcia piłą, który wynosi 300 minut. Kolejność wykonywanych zadań początkowych musi uwzględniać posiadane zasoby. Ze względu na fakt, iż firma posiada jedną wykrawarkę laserową to zadania związane z realizacją procesów ścieżki krytycznej są priorytetowe i powinny być wykonane jako pierwsze.

Deterministyczna suma czasów wykonania poszczególnych procesów dla korpusu wynosi 285 [min.] natomiast dla drzwi 310 [min.]. Obecnie polityka firmy w harmonogramowaniu zadań polega na etapowym rozpoczęciu i zakończeniu poszczególnych procesów w pojedynczych strumieniach. Warunkiem rozpoczęcia pierwszego etapu montażu jest zakończenie wszystkich zadań związanych z wytworzeniem korpusu i drzwi. Działania te nie są w pełni efektywne ponieważ najwcześniejsze zapotrzebowanie na drzwi występuje w 95 minucie od momentu rozpoczęcia procesu montażu. W związku z tym w całym strumieniu 2 (rys.1) istnieje zapas czasu równy 95 minut. W przypadku, gdy przepływ półproduktów następuje partiami, to generowana jest *muda* w postaci czekania korpusu aż drzwi nie zostaną w pełni wykonane. Czas czekania „korpusu na drzwi” w etapach przetwarzania wynosi 25 [min.] (= 310 – 285 tj. czas zakończenia produkcji drzwi minus czas zakończenia produkcji korpusu). Natomiast w etapie montażu występuje „czekanie drzwi” na zapotrzebowanie (95min.).

3. Wyznaczenie czasów realizacji dla ścieżki krytycznej

Analizowany system produkcyjny realizuje zlecenia pod indywidualne zamówienia zgodnie z MTO. Produkcja wyrobów na magazyn (MTS – Make to Stock) skutkuje wytworzeniem wyrobu, którego prawdopodobieństwo sprzedania jest bardzo małe. Duża customizacja jest głównym parametrem w kształtowaniu niskiej wartości wskaźnika EPEI. Dlatego w rozpatrywanym przypadku partia produkcyjna waha się w granicach kilku sztuk: 7 – 12. Analiza zleceń i harmonogramów produkcji za okres 12 miesięcy wykazała, że maksymalna liczba tych samych wyrobów wyniosła 17 sztuk. Występująca duża dynamika zmian zadań produkcyjnych i mała seria produkcyjna wymusza rozpatrywanie czasów produkcji jako zmienne losowe. W analizowanym systemie wytwórczym występują zmienne losowe dyskretne i ciągłe. Dyskretne zmienne losowe to liczba zleconych do wykonania zadań w systemie produkcyjnym w ustalonej chwili czasu, losowa liczba elementów oczekujących na realizację procesu lakierowania, losowa liczba realizowanych zadań w chwili Δt w każdym pojedynczym procesie itd.. Ciągłe zmienne losowe zależne są od czasu i należą do nich: losowy czas realizacji procesu, losowy czas oczekiwania na wykonanie, itp..

Najczęściej zmienne losowe określające czasy pojedynczych procesów produkcji występują zgodnie z gęstością zmiennej losowej o rozkładzie wykładniczym. Rozkład wykładniczy ma własność „braku pamięci” co znaczy, że niezależnie od długości $\Delta t + t_n$, pozostały czas pracy ma zawsze rozkład wykładniczy z tym samym parametrem λ co „początkowy” rozkład czasu pracy w chwili t_0 . Korzystając z tej własności oraz faktu, że produkcja odbywa się w małych partiach, zostaną wyznaczone funkcje gęstości czasów realizacji zadań produkcyjnych dla ścieżki krytycznej, odpowiednio korpusu i drzwi. Oznaczmy zmienne losowe: $T_{K_{\max}}$ jako maksymalny czas produkcji korpusu oraz $T_{D_{\max}}$ jako maksymalny czas produkcji drzwi. Wówczas:

$$T_{K_{\max}} = t_{L1}^K + t_{WM}^K + t_{GK2}^K + t_{ZK1}^K + t_L^K + t_{IK}^K \quad (1)$$

gdzie: indeks górny K – oznacza ścieżkę krytyczną dla korpusu. Ponadto poszczególne zmienne losowe: $t_{L1}^K \sim \text{Exp}(\lambda_{L1}^K)$; $t_{WM}^K \sim \text{Exp}(\lambda_{WM}^K)$; $t_{GK2}^K \sim \text{Exp}(\lambda_{GK2}^K)$; $t_{ZK1}^K \sim \text{Exp}(\lambda_{ZK1}^K)$; $t_L^K \sim \text{Exp}(\lambda_L^K)$; $t_{IK}^K \sim \text{Exp}(\lambda_{IK}^K)$

Korzystając z pracy [16] na sumę zmiennych losowych o rozkładzie wykładniczym, gdy spełniony jest warunek $\lambda_{L1}^K \neq \lambda_{WM}^K \neq \lambda_{GK2}^K \neq \lambda_{ZK1}^K \neq \lambda_L^K \neq \lambda_{IK}^K$, została wyznaczona funkcja gęstości prawdopodobieństwa $f_{T_{K_{\max}}}(t)$ zmiennej losowej $T_{K_{\max}}$, która ma postać:

$$f_{T_{K_{\max}}}(t) = \left[\lambda_{L1}^K \cdot \lambda_{WM}^K \cdot \lambda_{GK2}^K \cdot \lambda_{ZK1}^K \cdot \lambda_L^K \cdot \lambda_{IK}^K \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_{L1}^K t}}{\left(\lambda_{WM}^K - \lambda_{L1}^K \right) \cdot \left(\lambda_{GK2}^K - \lambda_{L1}^K \right) \cdot \left(\lambda_{ZK1}^K - \lambda_{L1}^K \right) \cdot \left(\lambda_L^K - \lambda_{L1}^K \right) \cdot \left(\lambda_{IK}^K - \lambda_{L1}^K \right)} + \frac{e^{-\lambda_{WM}^K t}}{\left(\lambda_{L1}^K - \lambda_{WM}^K \right) \cdot \left(\lambda_{GK2}^K - \lambda_{WM}^K \right) \cdot \left(\lambda - \lambda_{WM}^K \right) \cdot \left(\lambda - \lambda_{WM}^K \right) \cdot \left(\lambda - \lambda_{WM}^K \right)} + \frac{e^{-\lambda_{GK2}^K t}}{\left(\lambda_{L1}^K - \lambda_{GK2}^K \right) \cdot \left(\lambda_{WM}^K - \lambda_{GK2}^K \right) \cdot \left(\lambda_{ZK1}^K - \lambda_{GK2}^K \right) \cdot \left(\lambda_L^K - \lambda_{GK2}^K \right) \cdot \left(\lambda_{IK}^K - \lambda_{GK2}^K \right)} + \frac{e^{-\lambda_{ZK1}^K t}}{\left(\lambda_{L1}^K - \lambda_{ZK1}^K \right) \cdot \left(\lambda_{WM}^K - \lambda_{ZK1}^K \right) \cdot \left(\lambda_{GK2}^K - \lambda_{ZK1}^K \right) \cdot \left(\lambda_L^K - \lambda_{ZK1}^K \right) \cdot \left(\lambda_{IK}^K - \lambda_{ZK1}^K \right)} + \frac{e^{-\lambda_L^K t}}{\left(\lambda_{L1}^K - \lambda_L^K \right) \cdot \left(\lambda_{WM}^K - \lambda_L^K \right) \cdot \left(\lambda_{GK2}^K - \lambda_L^K \right) \cdot \left(\lambda_{ZK1}^K - \lambda_L^K \right) \cdot \left(\lambda_{IK}^K - \lambda_L^K \right)} + \frac{e^{-\lambda_{IK}^K t}}{\left(\lambda_{L1}^K - \lambda_{IK}^K \right) \cdot \left(\lambda_{WM}^K - \lambda_{IK}^K \right) \cdot \left(\lambda_{GK2}^K - \lambda_{IK}^K \right) \cdot \left(\lambda_{ZK1}^K - \lambda_{IK}^K \right) \cdot \left(\lambda_L^K - \lambda_{IK}^K \right)} \right) \quad (2)$$

Adekwatnie zostaje wyznaczona funkcja gęstości $f_{T_{D_{\max}}}(t)$ dla zmiennej losowej $T_{D_{\max}}$, która ma następującą postać:

$$T_{D_{\max}} = t_{D(L)}^D + t_{D(K_1)}^D + t_{D(K_2)}^D + t_{D(K_3)}^D + t_{D(S_1)}^D + t_{D(S_2)}^D + t_{D(Z)}^D + t_{D(S_2)}^D + t_{D(S_{z_2})}^D + t_L^D + t_{D(t)}^D \quad (3)$$

gdzie: indeks górny D – oznacza ścieżkę krytyczną dla produkcji drzwi. Ponadto poszczególne zmienne losowe: $t_{L1}^D \sim \text{Exp}(\lambda_{L1}^D)$; $t_{WM}^D \sim \text{Exp}(\lambda_{WM}^D)$; $t_{GK2}^D \sim \text{Exp}(\lambda_{GK2}^D)$; $t_{ZK1}^D \sim \text{Exp}(\lambda_{ZK1}^D)$; $t_L^D \sim \text{Exp}(\lambda_L^D)$; $t_{IK}^D \sim \text{Exp}(\lambda_{IK}^D)$

W kolejnych obliczeniach zostanie wyznaczona wartość oczekiwana dla funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f_{T_{K_{\max}}}(t)$ oraz $f_{T_{D_{\max}}}(t)$. I tak odpowiednio wzór (4) prezentuje wartość oczekiwaną funkcji $f_{T_{K_{\max}}}(t)$ a wzór (5) funkcji $f_{T_{D_{\max}}}(t)$.

$$E(T_{K_{\max}}) = \int_0^{\infty} f_{T_{K_{\max}}}(t) dt \quad (4)$$

$$E(T_{D_{\max}}) = \int_0^{\infty} f_{T_{D_{\max}}}(t) dt \quad (5)$$

Wyznaczone wartości oczekiwane $E(T_{K_{\max}})$ oraz $E(T_{D_{\max}})$ są głównym parametrem w procesie planowania i harmonogramowania zadań. Wartości te determinują czas rozpoczęcia zadań produkcji odpowiednio dla strumienia 1 (rys. 1) – wytworzenie korpusu oraz strumienia 2 (rys. 2) – wytworzenie drzwi.

4. Harmonogramowanie zadań

Harmonogramowanie zadań w złożonych strukturach produkcyjnych jest bardzo trudnym zadaniem. W rozpatrywanym przypadku uwzględnione muszą być algorytmy planowania dla wielu procesów [9], gdzie w każdym odosobnionym procesie występuje inne kryterium optymalizacyjne [11]. Np. w procesie wykrawania laserowego kryterium optymalizacyjne to minimalizacja generowanego odpadu. Funkcja ta wymusza rozpoczęcie zadań realizacji strumieni, których produkcja nie jest konieczna w chwili t_n i bez wpływu na opóźnienia mogłaby rozpocząć się w t_{n+m} dla $m=1,2,3,\dots,k$. Sytuacja ta generuje marnotrawstwo *muda* rodzaju: nadprodukcja i zbędne oczekiwanie.

W etapie krawędziowania funkcją optymalizacyjną jest minimalizacja czasów realizacji wszystkich zadań. Na tym etapie konieczna jest optymalizacja dla uszeregowania podzielnego, uwzględniającego przede wszystkim liczbę posiadanych zasobów maszynowych i zależną od tej liczby możliwą do osiągnięcia wydajność [9]. Ponadto

w etapie krawędziowania muszą być uwzględnione atrybuty obrabianego elementu, atrybuty i parametry maszyn oraz liczbę koniecznych do wykonania zadań w czasie Δt .

Innym typem szeregowania zadań jest szeregowanie niepodzielne, które występuje przykładowo w realizacji procesu lakierowania. Dział Lakierni posiada jedną linię, w której konieczne jest zastosowanie rozwiązań z teorii obsługi masowej. Do Działu Lakierni losowo trafiają grupy elementów gdzie każdy element powinien posiadać inny priorytet wykonania. Funkcją optymalizującą w Dziale Lakierni jest minimalizacja czasu czekania na realizację zadania dla wszystkich składowych strumieni ścieżki krytycznej.

Bardzo ważnym parametrem w harmonogramowaniu zadań w rozważanym przypadku jest uzyskanie poziomu jakości wykonywanych procesów. Każdy niepoprawnie wykonany produkt dyskwalifikuje go jako pełnowartościowy i wywołuje sprzężenie zwrotne. Rezultatem wystąpienia sprzężenia zwrotnego jest pojawienie się zapotrzebowania komponentu (półproduktu) na wejściu do systemu produkcyjnego. Sytuacja ta ma wpływ na zmniejszenie poziomu wydajności maszyn – w sytuacji gdy wydajność kształtowana jest na podstawie liczby prawidłowo wykonanych wyrobów. Ponadto bardzo często efektem złego planowania i harmonogramowania zadań przewyższających zdolności i możliwości systemu są zwiększona liczba wypadków oraz zwiększona awaryjność sprzętu co skutkuje wyższymi kosztami operacyjnymi [10].

5. Wnioski

W artykule została zastosowana metoda ścieżki krytycznej CPM – *Critical Path Method* do wyznaczenia czasów realizacji procesów produkcji dla korpusu oraz drzwi urządzeń chłodniczych z przeznaczeniem dla medycyny. Rozpatrywane strumienie zostały wydzielone jako kluczowe ze względu na proces montażu końcowego. Liczba procesów w ścieżce krytycznej dla drzwi jest większa o 5 procesów oraz suma czasów wykonania poszczególnych operacji jest również większa. Deterministyczne czasy wynikające z CPM dla korpusu wynoszą 285 minut, natomiast dla drzwi 310 minut. W procesie montażu końcowego występuje opóźnione zapotrzebowanie na drzwi, które wynosi około minimum 95 minut (maksimum 125 minut). Czas ten jest rezerwą, w harmonogramowaniu zadań w procesie wykrawania laserowego dla strumienia produkcji drzwi. W związku z różnym czasem zapotrzebowania na poszczególne komponenty, harmonogramowanie zadań początkowych, powinno uwzględniać występujące różnice, tak aby maksymalnie minimalizować poziom robót w toku tzw. WIP – work-in-process. Ze względu na fakt, iż firma posiada jedną wykrawarkę laserową to zadania związane z realizacją procesów ścieżki krytycznej są priorytetowe i powinny być wykonane jako pierwsze. Ponadto harmonogram kolejności wykonywanych zadań początkowych w analizowanym przypadku uwzględniać powinien:

- posiadane zasoby operacyjne (techniczne i ludzkie) – ilość posiadanych maszyn przyporządkowanych do realizacji poszczególnych procesów,
- zdolności produkcyjne wynikające z pracochłonności wytwarzanych półproduktów oraz atrybutów zasobów technicznych – czasów taktu realizacji poszczególnych elementów,
- uzyskane poziomy jakości z założonymi [12, 15] – w rozważanym przykładzie ze względu na dużą customizację nie występuje nadprodukcja na żaden półprodukt, w związku z tym w przypadku wystąpienia niezgodności jakościowej konieczna jest natychmiastowa reakcja na uzupełnienie wygenerowanego zapotrzebowania.

Literatura

1. Womack J. P., Jones D.T.: Lean thinking – szczupłe myślenie. ProdPress.com, Wrocław 2008.
2. Nyhuis P., Windhal H.P.: Fundamentals of Production Logistics. Theory, Tools and Applications. Springer – Verlag, Berlin Heidelberg 2009.
3. Bicheno J., Hollweg M.: The Lean Toolbox: The essential guide to Lean transformation. Picsie Books, Johannesburg 2008.
4. Rother M., Harris R.: Tworzenie ciągłego przepływu. Lean Enterprise Institut Poland, Wrocław 2007.
5. Hamrol A.: Strategie i praktyki sprawnego działania – Lean, Six Sigma i inne. Wydawnictwo PWN, Warszawa 2015.
6. Szatkowski K.: Nowoczesne zarządzanie produkcją – ujęcie procesowe. Wydawnictwo PWN, Warszawa 2014.
7. Czerska J.: Doskonalenie strumienia wartości. Wydawnictwo DIFIN, Warszawa 2009.
8. Bielecki M., Staszewska P.: Redukcja marnotrawstwa ruchu w przedsiębiorstwie produkcyjnym – studium przypadku. W: Efektywność i produktywność przedsiębiorstw, Tom 1, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2016.
9. Borowicka K., Bożejko W., Kacprzak Ł., Wodecki M.: Problem harmonogramowania zadań wielomaszynowych. W: Organizacja i zarządzanie produkcją, harmonogramowanie zleceń produkcyjnych, Tom 1, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2016.
10. Chlebus M., Werbińska – Wojciechowska S.: Issues on production process reliability assessment – review. Research in Logistics & Production, Vol.6, No.6, 2016, s.481-497.
11. Kostrzewski M.: Logistics facilities designing method-a study of a procedure for logistics facilities designing and its ol09 software implementation. Archives of Transport, Vol. 24, No. 3, 2012, s. 321– 340.
12. Michłowicz E., Zwolińska B.: Zastosowanie 6S w procesie anodowania. Logistyka, No. 4, 2015, s. 4906 – 4912.
13. Michłowicz E., Smolińska K., Zwolińska B.: Logistics engineering in a production company. Research in Logistics & Production, Vol. 5, No. 5, 2015, s. 503-513.
14. Zwolińska B., Kubica Ł.: Model wyznaczania uszkodzeń krytycznych. Journal of KONBiN, 2017.
15. Zwolińska B.: Analiza utrzymania założonego poziomu jakości. Autobusy: technika, eksploatacyjna, systemy transportowe, No. 6, 2016, s. 1625-1631.
16. Sum of independent exponentials.
<https://people.maths.bris.ac.uk/~mb13434/sumexp.pdf>

Dr inż. Bożena ZWOLIŃSKA
Mgr. inż. Małgorzata WERBIŃSKA
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
AGH w Krakowie
30-059 Kraków, al. A. Mickiewicza 30
tel./fax: (0-48) 600-393-943
e-mail: bzwol@agh.edu.pl