

DOSKONALENIE PROCESU PLANOWANIA PRODUKCJI Z WYKORZYSTANIEM ELEMENTÓW KONCEPCJI LEAN MANUFACTURING I PRZEMYSŁ 4.0. CZĘŚĆ II. METODY I NARZĘDZIA

Katarzyna ANTOSZ, Dorota STADNICKA, Paweł LITWIN,
Ryszard PERŁOWSKI, Arkadiusz RZUCIDŁO, Jarosław SĘP

Streszczenie: Istnieje wiele zasad, metod i narzędzi, w tym narzędzi informatycznych wspierających proces planowania. Wiele z nich stosowanych jest od lat, jednakże nie wszystkie przedsiębiorstwa je znają oraz stosują w praktyce. W niniejszej pracy omówiono wybrane metody i narzędzia, które wynikają z dobrych praktyk stosowanych w planowaniu produkcji, a powiązane są z koncepcją Lean Manufacturing oraz są elementem koncepcji Przemysł 4.0. Dodatkowo zaprezentowane narzędzia zastosowane zostały do doskonalenia organizacji procesu planowania w wybranym przedsiębiorstwie.

Słowa kluczowe: proces planowania, reguły planowania, Lean Manufacturing, Przemysł 4.0, gra dydaktyczna

1. Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach przedsiębiorstwa produkcyjne stają w obliczu różnych wyzwań, takich jak rosnąca konkurencja globalna, szybki postęp technologiczny, malejące zasoby, rosnące wyzwania środowiskowe lub zapotrzebowanie na zindywidualizowane produkty. Tendencje te wiążą się z krótszymi cyklami życia produktu, co wymaga sprawnego procesu planowania, który wpływa na terminowość dostaw realizowanych do klienta [1].

Optymalne planowanie produkcji i harmonogramowanie to duże wyzwanie dla firm produkcyjnych. W szczególności złożone jest zadanie harmonogramowania zleceń produkcyjnych, przydzielanie zadań produkcyjnych i zasobów, takich jak maszyny, ludzie i materiały. W praktyce problem planowania jest złożony z powodu wielu ograniczeń istniejących dla zadań i maszyn, bardziej złożonych procesów produkcyjnych i różnych kryteriów optymalizacji planowania [2]. Celem procesu planowania produkcji jest wyznaczenie zapotrzebowania przedsiębiorstwa na produkty finalne przy uwzględnieniu okresów planistycznych i ilości, określenie momentu rozpoczęcia i zakończenia zadania oraz ustalenie, gdzie ma być ono realizowane [3].

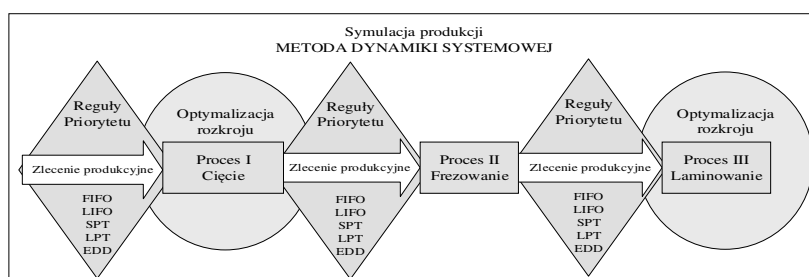
W ostatnich latach prowadzonych jest wiele badań dotyczących planowania, nowych koncepcji i technik informatycznych pozwalających na szeregowanie zadań produkcyjnych. W wyniku innowacji, takich jak CIM (ang. *Computer Integrated Management*) i JIT (ang. *Just-In-Time*), w dzisiejszych firmach tworzone są nowe procesy, które pozwalają uchwycić korzyści wynikające z powtarzalnego wytwarzania [4, 5]. Stosowane są również dwupoziomowe metody planowania produkcji i planowania zadań w systemach hybrydowych [6], określa się optymalną strategię planowania [7], czy też z powodzeniem wykorzystuje się metody APP (ang. *Aggregate Production Planning*) [8].

Niestety mimo wielu dostępnych narzędzi proces planowania w wielu przypadkach jest niewłaściwie realizowany. Główne przyczyny to przede wszystkim: brak uwzględnienia dostępnych zasobów oraz aktualnie realizowanych zleceń produkcyjnych, źle dobrane narzędzia i techniki planowania lub niewystarczająca wiedza pracowników realizujących proces planowania [9]. Niewłaściwa realizacja procesu planowania powoduje opóźnienia w dostawach i koszty z tym związane.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie możliwości usprawnienia procesu planowania z wykorzystaniem wybranych metod i narzędzi. Rozpoczęto od prostych narzędzi, jak reguły planowania. Następnie przedstawiono możliwości optymalizacji planowania procesów produkcyjnych. Na zakończenie zaprezentowano, jak w procesie planowania można wykorzystać symulacje komputerowe będące elementem koncepcji Przemysł 4.0. Niniejszy artykuł jest kontynuacją zagadnień poruszanych w pracy [10], gdzie przedstawiono związek koncepcji Przemysł 4.0 z procesem planowania.

2. Model zastosowania proponowanych reguł i narzędzi informatycznych do wspierania procesu planowania

Proces planowania będzie bardziej efektywny jeżeli zostaną odpowiednio dobrane i zastosowane reguły planowania. Dodatkowo proces planowania może być wspierany różnymi narzędziami informatycznymi. W niniejszej pracy zaprezentowano, jakie reguły i w jaki sposób można zastosować w procesie planowania produkcji. Dodatkowo proponuje się zastosowanie wybranych narzędzi informatycznych. Przedstawione propozycje odnoszą się do konkretnych problemów związanych z planowaniem, a występujących w firmie produkującej fronty meblowe, które to problemy bardziej szczegółowo opisano w pracy [10]. Rysunek 1 prezentuje zakres zastosowania przedstawionych reguł i narzędzi informatycznych we wspomnianym procesie planowania produkcji frontów meblowych.



Rys. 1. Model zastosowania proponowanych reguł i narzędzi informatycznych

Reguły planowania będą miały zastosowanie na etapie ustalania priorytetów dla realizacji zleceń produkcyjnych. Narzędzia informatyczne do optymalizacji rozkroju mogą znaleźć zastosowanie w dwóch procesach, w procesie cięcia oraz w procesie laminowania. Natomiast symulacje komputerowe będą odnosiły się do całego systemu produkcyjnego, co szerzej zostanie przedstawione w dalszej części niniejszej pracy.

3. Reguły planowania – reguły priorytetu

Reguły planowania wykorzystywane są w procesie Sterowania Realizacją Produkcji (PAC, ang. *Production Activity Control*), etapie będącym wynikiem procesu

planowania. Reguła priorytetu jest funkcją, która każdemu zadaniu oczekującemu na wykonanie w kolejce przed rozpatrywaniem stanowiskiem przyporządkowuje pewną wielkość (priorytet). Uporządkowanie zadań według tych wielkości oznacza ustawienie zadań (zleceń produkcyjnych) w odpowiedniej kolejności [11]. Proces planowania z uwzględnieniem reguł priorytetów powinien być realizowany przez planistę na etapie przyjmowania zleceń do realizacji. W praktyce zastosować możemy następujące reguły planowania [12, 13]:

FIFO (ang. *First In First Out*) – kolejność wykonania zadań według kolejności ich zgłoszeń. W praktyce oznacza to, że zadanie, które zostało przyjęte do realizacji jako pierwsze, w przypadku konfliktu wykonywane jest jako pierwsze.

LIFO (ang. *Last in First Out*) – kolejność wykonania zadań odwrotnie do kolejności ich zgłoszeń. W praktyce oznacza to, że to zadanie, które zostało przyjęte do realizacji jako ostatnie, w przypadku konfliktu wykonywane jest jako pierwsze.

SPT (ang. *Shortest Processing Time*) – kolejność wykonania zadań według rosnących czasów przetwarzania zadań. W praktyce oznacza to, że jako pierwsze wybierane jest to zadanie, które ma najkrótszy czas przetwarzania.

LPT (ang. *Latest Processing Time*) – kolejność wykonania zadań według malejących czasów przetwarzania zadań. W praktyce oznacza to, że jako pierwsze wybierane jest to zadanie, które ma najdłuższy czas przetwarzania.

EDD (ang. *Earliest Due Date*) – kolejność wykonania zadań według terminów zamknięcia zleceń, czyli zadanych czasów zakończenia. Oznacza to, że obliczamy sumę czasów począwszy od przyjęcia zlecenia do systemu, aż do zakończenia danego zlecenia i wybieramy zlecenie z mniejszą sumą (najwcześniejszym terminem realizacji).

Przedstawione reguły priorytetu zostaną zastosowane do szeregowania zadań produkcyjnych w analizowanym przedsiębiorstwie.

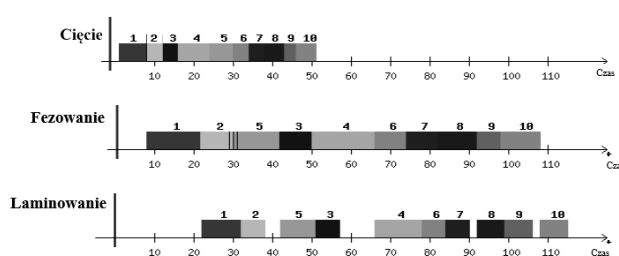
Do szeregowania przyjęto następujące dane: liczba i określony czas realizacji zleceń produkcyjnych – tabeli 1, liczba stanowisk roboczych (operacji) – 3, operacje wchodzące w skład każdego zlecenia wykonywane są według ustalonej kolejności na odpowiadających im stanowiskach roboczych – marszruta technologiczna (1 – cięcie, 2 – frezowanie, 3 – laminowanie), w umownych jednostkach czasu (zastrzeżone przez firmę). Wynik planowania z wykorzystaniem reguł zostanie zaprezentowany w postaci wykresu Gantta.

Tab. 1. Dane wejściowe do procesu planowania z wykorzystaniem reguł

Nr zlecenia/ Kolejność zgłoszenia	Jednostki czasu			Liczba elementów	Czas przetwarzania [jednostki czasu]
	Cięcie	Frezowanie	Laminowanie		
1	7	14	10,5	7	31,5
2	4	8	6	4	18
3	4	8	6	4	18
4	8	16	12	8	36
5	6	12	9	6	27
6	4	8	6	4	18
7	4	8	6	4	18
8	5	10	7,5	5	22,5
9	3	6	4,5	3	13,5
10	5	10	7,5	5	22,5

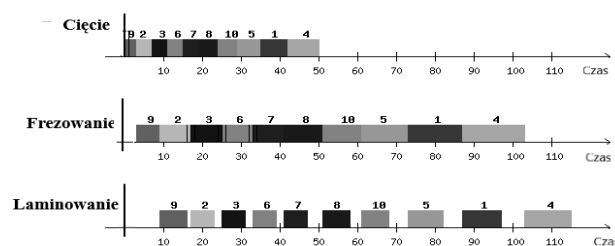
Pierwsza z reguł LIFO, według której zlecenia produkcyjne wykonywane są zgodnie z kolejnością z jaką zostały zgłoszone do realizacji. Numer zlecenia produkcyjnego

odpowiada kolejności zgłoszenia do realizacji. Przed wykonaniem harmonogramu niezbędne jest określenie, w jakiej chwili możliwe jest rozpoczęcie zadania. Operacja może być rozpoczęta w chwili otwarcia zlecenia pod warunkiem, że maszyna jej przypisana jest wolna, a także w momencie zakończenia poprzedniej operacji zlecenia, pod tym samym warunkiem. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki planowania dla tej reguły – wykres Gantta. Na stanowisku 1 – cięciu, zlecenia zostały zaplanowane od 1 do 10, zgodnie z ich kolejnością wpłynięcia. Następne operacje (frezowanie, laminowanie) realizowane są również we kolejności przyjęcia poszczególnych zleceń na te stanowiska. Odwrotna kolejność realizacji zleceń, będzie w regule LIFO. Całkowity czas realizacji zleceń zarówno wg reguły FIFO i LIFO to 115 umownych jednostek czasu.



Rys. 2. Wykres Gantta dla reguły FIFO

Reguła priorytetu SPT polega na uszeregowaniu zleceń produkcyjnych według rosnących czasów przetwarzania. Otrzymane uszeregowanie przedstawione zostało na rys. 3. Szeregowanie zadań na pierwszym stanowisku rozpoczęto od zlecenia 9, którego czas przetwarzania jest najkrótszy i wynosi 13,5 jednostki czasu. Jako ostatnie realizowane jest zlecenie 4 z czasem przetwarzania równym 36. Pełna kolejność wygląda następująco: 9, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 5, 1, 4. Całkowity czas realizacji zleceń wg tej reguły to 117 umownych jednostek czasu.



Rys. 3. Wykres Gantta dla reguły SPT

Według kolejnej reguły jaką jest LPT sekwencja realizowania poszczególnych zleceń ustalona zostaje zgodnie z najdłuższym czasem przetwarzania, odwrotnie niż do SPT. Najdłuższy czas przetwarzania 36 posiada zlecenie 4 i będzie pierwsze w kolejce do realizacji. Jako ostatnie zlecenie będzie realizowane zlecenie 9 z czasem 13,5. Całkowity czas realizacji zleceń wg tej reguły to 115 umownych jednostek czasu.

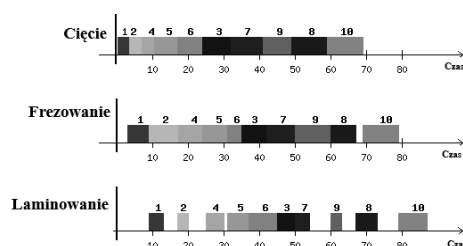
Następną zastosowaną regułą podczas szeregowania zleceń jest EDD. Zastosowana reguła ustawia zlecenia w kolejności według najwcześniejszego terminu zakończenia. W tabeli 2 przedstawiono dane potrzebne do zastosowania reguły: nr zlecenia, datę wpłynięcia zlecenia oraz wymagany czas i termin realizacji zlecenia. Zgodnie z tą regułą

należy policzyć sumę czasów począwszy od przyjęcia zlecenia do systemu aż do zakończenia danego zlecenia. W analizowanym przypadku dzień wpłynięcia zlecenia jest automatycznie pierwszym dniem produkcji. Jako pierwsze wybierane jest zlecenie z mniejszą sumą.

Tabela 2. Dane wejściowe do procesu planowania z wykorzystaniem reguły EDD

Nr zlecenia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dzień wpłynięcia [dzień]	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
Czas realizacji [w dniach]	4	5	5	4	4	4	4	6	3	5
Wymagany termin zakończenia zlecenia [kolejny dzień produkcji]	4	5	7	6	6	6	7	9	7	9

Zgodnie z tą regułą największy priorytet posiada zlecenie 1, którego termin zakończenia jest najwcześniejszy. Zlecenie to wpłynęło pierwszego dnia, a jego wymagany termin realizacji to 4 dni. Pełna sekwencja wykonywania zleceń produkcyjnych to: 1, 2, 4, 5, 6, 3, 7, 9, 8, 10. Uzyskany według reguły EDD harmonogram przedstawiony został na rysunku 4. Całkowity czas realizacji zleceń według tej reguły wynosi 95.



Rys. 4. Wykres Gantta dla reguły EDD

Porównanie czasów realizacji zleceń według rozważanych reguł wskazuje, że najkrótszy czas realizacji zleceń uzyskano dla reguły EDD, a najdłuższy dla reguły SPT.

Przedstawione przykłady dotyczą procesu szeregowania zleceń produkcyjnych na wejściu. Jednak w przypadku występujących zakłóceń (odchyień od planu) zachodzi potrzeba szeregowania zadań na poziomie stanowiska. Np. opóźnienie wykonania operacji spowoduje konflikt z zaplanowanym wcześniej kolejnym zleceniem. W takiej postaci reguły priorytetu porządkują zadania oczekujące na realizację przed maszyną zgodnie z pewnym lokalnym kryterium, przypisując maszynie zadanie o najwyższym priorytecie, gdy tylko będzie dostępne. W przypadku gdy jedna reguła nie pozwala na jednoznaczne rozstrzygnięcie kolejności, należy zastosować kombinację kilku reguł, przypisując im zróżnicowane wagi. Pomocnym może być również utworzenie priorytetu złożonego w postaci tablicy wskaźników priorytetów, która zawiera przemianowane wartości wskaźników prostych.

4. Wykorzystanie programów do optymalizacji rozkroju

W obszarze planowania produkcji implementacja metod, dobrych praktyk, np. w postaci zastosowanych reguł planowania, jest już wspomaganie produkcji, ale warto również zwrócić uwagę na rozwiązania informatyczne. Narzędzia te mogą być wykorzystane do wspomaganie poszczególnych etapów planowania i realizacji produkcji, jak również do

pojedynczych zabiegów lub czynności, co pozwoli na zwiększenie efektywności pracy. Narzędziami mogą być pojedyncze programy lub też ich zestawy, ale również zawansowane systemy dedykowane konkretnym rozwiązaniom. Przy doborze odpowiedniego programu ważna jest identyfikacja niezbędnych funkcjonalności przyszłego narzędzia wspomagającego. Wzrost efektywności pracy, szczególnie w analizowanym procesie planowania produkcji, dzięki zastosowaniu takich rozwiązań, może zostać uzyskany poprzez: zwiększenie szybkości wykonywania zadania, zmniejszenie poziomu skomplikowania czynności, odciążenie pracownika.

Optymalizacja ułożenia wyrobów (formatek) w rozpatrywanym przypadku gry dydaktycznej [10] jest przydatna w dwóch etapach: w procesach cięcia i laminowania. W procesie cięcia optymalne ułożenie wykroju bezpośrednio wpływa na zmniejszenie ilości odpadów, jak również na efektywność czasową procesu. W procesie laminowania, faza planowania procesu jest niezwykle podobna do cięcia, lecz w tym przypadku należy uwzględnić dodatkowo jeszcze jeden ważny czynnik tzn. kierunek ułożenia formatek. W przypadku cięcia ułożenie pionowe lub poziome nie ma znaczenia. Natomiast w procesie laminowania istotne jest, aby kierunek wzoru układał się w sposób zgodny z zamówieniem.

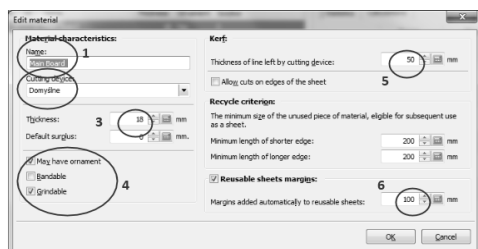
Ponieważ te dwa etapy w procesie produkcyjnym są podobne funkcjonalnie, do ich wspomagania można wykorzystać ten sam program. Planowanie jednak należy przeprowadzić oddzielnie dla każdego procesu. Nierozłącznym elementem przy doborze programu jest określenie podstawowych wymagań, jakie są wskazane dla wdrożenia programu w określonym środowisku roboczym. Na podstawie dokonanej analizy, można określić zestaw wymagań, co pozwoli na dobór odpowiedniego narzędzia. Analiza wymagań środowiska zaczyna się od ustalenia parametrów wejściowych, które determinują ułożenie rozkroju w procesach cięcia i laminowania. Ważnym jest format płyty, z której mają być wykonane formatki oraz wielkość stołu do laminowania. Dodatkowo znaczenie mają: rozmiar frontu, klient (zamówienie tego samego klienta, priorytet), kolor i faktura (istotny dla procesu laminowania), termin realizacji (priorytet). Założenia w grze obejmują jeden rozkrój dziennie, czyli wypełnienie 600 cm² powierzchni formatkami do wycięcia i laminowania – 2 x 300 cm². Warto zwrócić uwagę, że w przypadku procesu laminowania należy pamiętać o na kierunku faktury laminatu. Przedstawione parametry wpływają na ustawienie odpowiedniej kolejności zadań realizowanych w danym dniu.

W tradycyjnym układzie, w którym to pracownik rozpoznając parametry, układa manualnie kolejkę zadań do wycięcia, całkowity czas planowania obejmuje: identyfikację poszczególnych zamówień do realizacji i analizę kolejkwania w postaci układania kolejnych formatek na wzorniku płyty. W przypadku zastosowania narzędzia do optymalizacji rozkroju czasem roboczym pracownika jest tylko czas wprowadzenia parametrów do systemu. Pozostałe zadania, czyli optymalizacja rozkroju, należy już do programu, który dobiera optymalny układ rozkroju. Program analizując rozkrój, czy też laminowanie, planuje ułożenie zleceń według kilku kryteriów (np. w pierwszej kolejności małe formatki, w pierwszej kolejności duże formatki itd.). Ostatecznie operator decyduje o układzie finalnym. Program dobiera najlepsze rozwiązania (według różnych kryteriów optymalizacji) sugerując je automatycznie. Pozwala jednak operatorowi na jego własny wybór. Wybrany schemat zostanie przesłany na maszynę. W przypadku laminowania przydatny jest parametr koloru, który w tym procesie oznacza kierunkowość faktury. Na przykład w procesie cięcia formatka 70x50 cm może być potraktowana alternatywnie, jako 50x70 cm². Jednak w przypadku laminowania układ wymiarów ma już znaczenie właśnie ze względu na kierunek faktury.

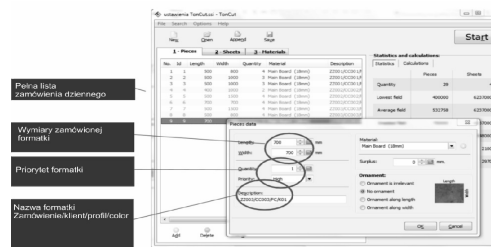
Na rynku jest wiele pozycji, które uwzględniają tego rodzaju potrzeby. Dla przykładu można znaleźć produkty takie jak: Optimic, Nowy Rozkrój, CAD Rozkrój oraz TonCut. Są to produkty o podobnej funkcjonalności. W przypadku, gdy zakres wymagań wybiega poza opcje oferowane przez gotowe programy zawsze można zaprojektować rozwiązanie indywidualne. Do doskonalenia procesu planowania dla analizowanego przedsiębiorstwa dowolny ze wspomnianych produktów spełnia określone wyżej wymagania. Wybrano program TonCut. Proces planowania z wykorzystaniem tego narzędzia informatycznego składa się z 6 następujących etapów:

Etap 1. Ustalenie parametrów procesu. W analizowanym przypadku materiałem będzie płyta do planowania rozkroju, która jest wspólna dla wszystkich wykrojów. Do programu należy wprowadzić parametry procesu. Przedstawiono je na rys. 5. Są to: nazwa płyty (1), narzędzie do cięcia (2), grubość płyty (3), naddatek na obróbkę (4) oraz grubość linii odpadu pozostawionej przez urządzenie tnące (5). Jest to parametr ważny dla kolejnego procesu (procesu frezowania), jako naddatek na przyszłą obróbkę. W przypadku manualnego planowania rozkroju jest to parametr kalkulowany dla konkretnego układu formatek. Operator musi wyliczyć go samodzielnie. Podane zostaje również kryterium odzysku, czyli parametr decydujący o uznaniu resztek pozostawionych po realizacji wykroju formatek jako płyty do uwzględnienia w następnym planowanym rozkroju (np. na kolejny dzień). Jest to istotne z punktu widzenia oszczędności w procesie produkcyjnym. Niezbędnym parametrem są marginesy (6), które definiują tolerancję na np. zniszczone krawędzie płyty w rozkroju, a w przypadku laminowania to naddatek na rozcięcie laminatu.

Etap 2. Wprowadzenie formatek do wycięcia dla jednego dnia roboczego. Etap ten związany jest z określeniem zakresu zadań dnia roboczego, bądź wskazania wszystkich robót w zależności od potrzeby (rys.6).



Rys. 5. Interfejs TonCut – definiowanie parametrów płyty



Rys. 6. TonCut – planowanie cięcia na jeden dzień roboczy

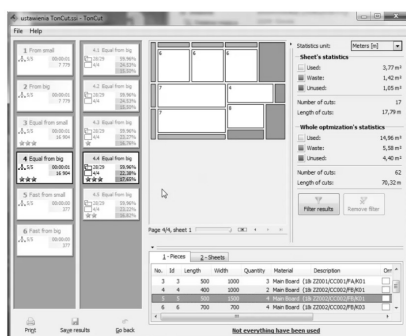
W przypadku ograniczenia się do dnia roboczego wprowadzenie wszystkich formatek wskazuje, czy płyta (jedna dziennie) jest wykorzystana w całości, czy też zadań jest zbyt wiele i niektóre muszą być przesunięte na inny dzień roboczy. Na tym etapie oprócz rozmiarów formatki ustala się również priorytet w kolejce do rozkroju (trzy poziomy: niski, normalny i wysoki). Zadania niezrealizowane w danym dniu dostają priorytet wysoki w następnym dniu roboczym. Określa się również materiał (w analizowanym przypadku jeden rodzaj płyty, bądź dla laminowania jeden rodzaj laminatu) oraz nazwę, która identyfikuje formatkę na wykroju. Program wykazuje bardzo elastyczne podejście do planowania pozwalając na szybką korektę aktualnego dnia roboczego. Ma to szczególne znaczenie w przypadku, gdy istnieje ograniczenie co do liczby rozkrojów na dzień roboczy.

Etap 3. Obliczenie statystyki wykroju. Program podaje kalkulacje związane z: liczbą potrzebnych płyt do zaplanowania wszystkich wprowadzonych zadań, najmniejszą, średnią

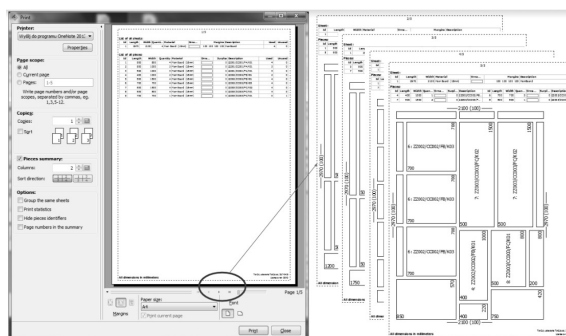
i największą powierzchnią do wycięcia, całkowitą powierzchnią zajmowaną przez formatki, najkrótszą i najdłuższą krawędzią, obwodem całkowitym wycięcia, obwodem formatek (ponieważ są jeszcze odpady) oraz sumą długości i szerokości.

Etap 4. Optymalizacja wykroju. Ważną funkcjonalnością programu jest możliwość wyboru przez operatora kryterium optymalizacji dla aplikacji [14, 15]. Ułożenie formatek można modyfikować ze względu na parametry gabarytowe. Na przykład program pozwala na rozpoczęcie układania ustawienia w pierwszej kolejności małych formatek lub dużych. W przypadku manualnego ustalania kolejki tego rodzaju operacje wymagają dużego doświadczenia operatora. Wykorzystanie programu pozwala na szybkie i bezstresowe działanie operatora. Program na bieżąco wskazuje statystyki właściwe dla każdej wybranej opcji ułożenia, co dodatkowo podnosi poziom kontroli nad procesem zarówno cięcia jak i laminowania (rys. 7).

Etap 5. Wydruk kart procesu cięcia. Program generuje układ na maszynie (rys. 8) tworząc roboczy plik wsadowy kompatybilny z urządzeniami zgodnymi z technologią cyfrowych maszyn do cięcia. Plik gotowy jest do aplikacji do urządzeń [14].



Rys. 7. TonCut – optymalizacja rozkroju



Rys. 8. TonCut – wydruk kart procesu cięcia

Etap 6. Wydruk kart z oznaczeniem formatek oraz raportem zużycia materiałów. Ostatnim elementem jest wydruk poszczególnych kart procesowych z oznaczeniem formatek oraz fragmentów stanowiących odpady, a także pozostałości płyty, które nadają się do ponownego wykorzystania. Te ostatnie uwzględnić trzeba jako nowe materiały.

Podany przykład wykorzystania programu do przygotowania procesu cięcia i laminowania wskazuje, że zastosowanie wsparcia za pomocą nawet gotowego (dostępnego na rynku) rozwiązania przynosi duże korzyści w optymalizacji procesu produkcyjnego.

5. Symulacje realizacji produkcji na etapie planowania

5.1. Podstawy modelowania z wykorzystaniem metody dynamiki systemowej

Kolejnym narzędziem, które możemy wykorzystać do wspomagania procesu planowania są symulacje pozwalające na przybliżone odtworzenie rzeczywistości w modelu komputerowym [16].

Dynamika systemowa (SD, ang. *System Dynamics*) jest techniką symulacji ciągłej i jest od dawna szeroko stosowana do modelowania i symulacji systemów logistycznych i produkcyjnych [17, 18, 19], w których analizuje się trzy podstawowe przepływy:

zamówień, materiałów i informacji. Autorzy pracy [20] włączają SD do oprogramowania do modelowania systemów produkcyjnych. Stosowanie symulacji pozwala na testowanie zmieniających się planów produkcyjnych w środowisku wirtualnym, bez ingerowania w rzeczywisty proces. Dzięki symulacji pracownicy zajmujący się planowaniem produkcji mogą poznać zachowanie systemu z określonym planem i ustalić odpowiednie poziomy zapasów, obsadę stanowisk czy terminy realizacji zamówień.

Według Stermana [21] nie istnieje recepta gwarantująca opracowanie poprawnego modelu systemu i zapewnijająca jego użyteczność. Wynika to z faktu, że proces modelowania jest z natury procesem twórczym, a twórcy mają różne cele i podejścia do wykonywanej pracy. Posługiwanie się dynamiką systemową oznacza jednak przestrzeganie określonej procedury modelowania. Pierwszym etapem wspomnianej procedury jest sformułowanie problemu i określenie celu tworzenia modelu. Następnym krokiem jest identyfikacja kluczowych czynników wpływających na problem, ustalenie głównych sprzężeń zwrotnych i określenie granic modelowanego systemu. Rezultaty tych działań pozwalają na wykonanie opisu słownego i diagramów graficznych przedstawiających powiązania pomiędzy elementami modelowanego systemu. W kolejnym etapie budowany jest model matematyczny systemu, który jest następnie poddawany symulacji. Wyniki symulacji (tak zwany przebieg bazowy) pokazujące zachowanie się systemu w czasie porównywane są z dostępną wiedzą na temat rzeczywistego systemu, co stanowi podstawę weryfikacji modelu. Model jest weryfikowany do osiągnięcia zadowalającego odzwierciedlenia zachowania realnego systemu. Po zweryfikowaniu modelu można przystąpić do symulacji efektów zmian reguł decyzyjnych (eksperymenty symulacyjne), w celu zbadania ich wpływu na zachowanie systemu. Porównanie wyników przebiegu bazowego z wynikami eksperymentów symulacyjnych pozwala na ocenę efektu ekonomicznego wprowadzanych zmian. Syntezą modelowania i symulacji zachowania systemu są zmiany wdrażane w rzeczywistym systemie, zgodnie ze wskazaniem wynikającymi z oceny efektów symulacji.

5.2. Model i symulacja wybranego procesu produkcyjnego

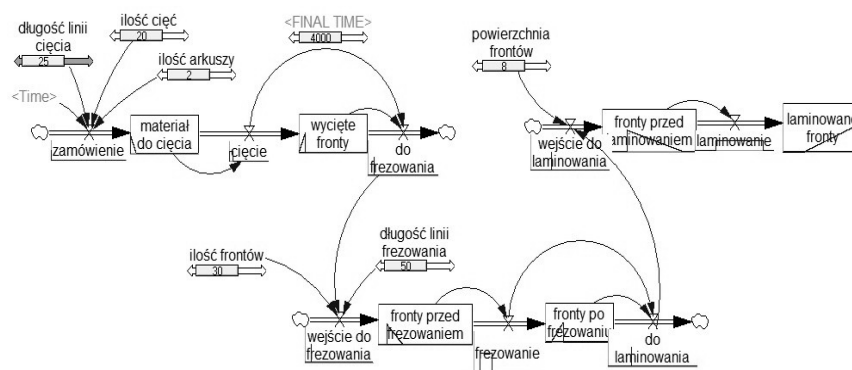
W analizowanym przedsiębiorstwie [10] po przyjęciu zamówienia klienta dane obejmujące liczbę i rozmiary frontów wprowadzane są do programu komputerowego optymalizującego rozkroj płyt. Wynikiem działania programu jest plan rozkroju płyt meblowych (arkuszy), zawierający liczbę arkuszy do cięcia, liczbę cięć i długość linii cięcia. Proces produkcji frontów meblowych realizowany jest jako sekwencja trzech operacji. Są to kolejno: cięcie, frezowanie i laminowanie. Proces produkcyjny analizowanego przedsiębiorstwa pozwala na wykonanie symulacji, która po wprowadzeniu danych zamówienia klienta (długość linii cięcia, liczba cięć, liczba arkuszy, liczba frontów, długość linii frezowania, powierzchnia frontów) oraz parametrów procesu produkcyjnego (m. in.: prędkość cięcia, czas nastawu cięcia, czas zmiany arkusza, prędkość frezowania, czas mocowania frontu na frezarce, czas laminowania) prezentuje czasy wykonania operacji oraz całkowity czas realizacji zamówienia.

Na rynku znaleźć można wiele programów komputerowych wspomagających tworzenie i symulację modeli System Dynamics. Do najbardziej popularnych należą AnyLogic, Powersim, Vensim, Stella oraz IThink. Do przeprowadzenia badań, których wyniki zaprezentowano w niniejszym artykule wykorzystano pakiet symulacyjny Vensim Pro 6.4E. Rysunek 9 przedstawia model procesu produkcji frontów wykonany w programie Vensim. Zasady budowy modeli symulacyjnych opisano szeroko w pozycjach [17, 20, 21]

Z uwagi na dydaktyczny cel przedstawionej analizy przygotowany model zawiera założenia upraszczające: podczas symulacji realizowane są prace związane z jednym zamówieniem, kolejne operacje procesu produkcyjnego inicjowane są po zakończeniu operacji poprzedzających (frezowanie rozpoczyna się po zakończeniu cięcia, laminowanie po frezowaniu). Przykłady bardziej złożonych modeli systemów produkcyjnych znaleźć można w pracach [22,23]. Równanie (1) przedstawia przykład formuły strumienia „do frezowania” przekazującego fronty po zakończeniu procesu cięcia.

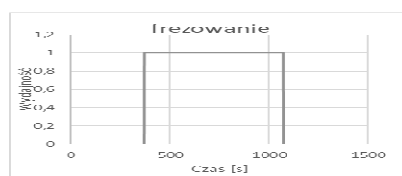
$$\text{IF THEN ELSE}(\text{wycięte fronty} > 0; \text{AND: cięcie} = 0, \text{wycięte fronty}, 0) \quad (1)$$

Prezentowana formuła działa w oparciu o wyrażenie warunkowe IF THEN ELSE. Jeśli spełnione są dwa warunki ($\text{wycięte fronty} > 0$ – ilość frontów po cięciu jest większa od zera oraz $\text{cięcie} = 0$ – proces cięcia jest zakończony) wszystkie wycięte fronty przekazywane są do strumienia „wejscie do frezowania”. W przeciwnym przypadku (kiedy co najmniej jeden warunek nie jest spełniony) fronty nie są przekazywane.



Rys. 9. Model strukturalny procesu produkcji frontów meblowych

Dane zamówienia klienta można wprowadzać przed uruchomieniem symulacji (wartości zmiennych decyzyjnych) lub ustawiać za pomocą suwaków podczas symulacji. W trakcie symulacji podgląd modelu prezentuje przebieg poszczególnych operacji (cięcie, frezowanie, laminowanie) oraz poziomy magazynów (np.: materiał do cięcia, wycięte fronty, fronty przed frezowaniem, itd.). Na rysunku 10 przedstawiono przykładową charakterystykę procesu frezowania. Dla analizowanego zamówienia proces frezowania rozpoczyna się w 370 sekundach procesu produkcyjnego i zostaje zakończone po 700 sekundach pracy frezarki z nominalną wydajnością.



Rys. 10. Przebieg procesu frezowania

Przygotowany model procesu pozwala na oszacowanie czasu realizacji zamówienia klienta na etapie planowania produkcji. Analizę można prowadzić łącznie dla zamówień

przyjmowanych w danym dniu roboczym i na jej podstawie określać terminy realizacji poszczególnych zamówień. Model może zostać rozszerzony o nieplanowane (generowane losowo) przerwy w pracy maszyn (np. wynikające z awarii maszyn) oraz przypadki wytworzenia wyrobów niezgodnych.

6. Podsumowanie

Zaprezentowane w artykule metody mogą, w szerokim zakresie, wspomóc proces planowania. Wdrożenie reguł planowania może znacznie ułatwić proces szeregowania zarówno zadań, jak również operacji produkcyjnych. Zastosowanie reguł priorytetu w rzeczywistych warunkach procesu planowania nie jest trudne, jednak wybór odpowiedniej reguły priorytetu musi być dokonany z uwzględnieniem bieżącej sytuacji i celów przedsiębiorstwa.

Zastosowanie informatycznych narzędzi wspomagających proces planowania pozwoli na szybszą realizację działań połączoną z minimalizacją błędów możliwych do popełnienia. Planowanie dzięki zastosowaniu technik informatycznych jest procesem bardziej efektywnym i elastycznym.

Literatura

1. Koren Y., Shpitalni M.: Design of reconfigurable manufacturing systems. *Journal Manufacturing Systems*, 29, 4, 2011, 130–141.
2. Negahban A., Smith J.S.: Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal Manufacturing Systems*, 32, 4, 2014, 241– 61,
3. Hurtubise S., Claude O., Gharbi A.: Planning Tools for Managing the Supply Chain. *Computers & Industrial Engineering*, 46, 2004, 763–779.
4. Kreipl S., Michael P.: Planning and Scheduling in Supply Chains: An Overview of Issues in Practice. *Production and Operations Management* 13, 1, 2004, 77–92.
5. Vollmann, T. E., Berry W. L., Whybark C. D., Jacobs F. R.: *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management*. Irwin McGraw-Hill, New York, 2005.
6. Hang-Min H., ChoIn-Jae J.: A two-level method of production planning and scheduling for bi-objective re-entrant hybrid flow shops, *Computers & Industrial Engineering*, 106, 2017, 174–181.
7. Chiang Ch., Min-Hsiu F., Yeu-Shiang H.: Production planning of new and remanufacturing products in hybrid production systems, *Computers & Industrial Engineering*, 108, 2017, 88–99.
8. Hahna G.J., Brandenburg M.: A sustainable aggregate production planning model for the chemical process industry, *Computers & Operations Research*, 109, 2017, 445–448.
9. Abassa S., Gomma A.M., Gaber G., Elsharawy M., Elsaid Sh.: Generalized production planning problem under interval uncertainty, *Egyptian Informatics Journal*, 11, 1, 2010, 27–31.
10. Stadnicka D., Litwin P., Antosz K., Safin D., Perłowski R., Rzucidło A.: Doskonalenie procesu planowania produkcji z wykorzystaniem elementów koncepcji Lean Manufacturing i Przemysł 4.0. Część I. Gra dydaktyczna. (2018), XXI Konferencja Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Zakopane 25-27.02.2018.
11. Wisniewski T., Korytkowski P., Zaikin O., Pesikov E.: Using Dynamic Priority Rules for Optimization of Complex Manufacturing Systems, *IFAC Proceedings*, 45, 6, 2012, 1359–1365.

12. Öner-Közen M., Minner S.: Impact of priority sequencing decisions on on-time probability and expected tardiness of orders in make-to-order production systems with external due-dates, *European Journal of Operational Research*, 263, 2, 2017, 524–539,
13. Hunsucker J.L., Shah J.R.: Comparative performance analysis of priority rules in a constrained flow shop with multiple processors environment, *European Journal of Operational Research*, 72, 1, 1994, 102–114.
14. Makhanov S.S., Anotaiapaiboon W.: *Advanced Numerical Methods to Optimize Cutting Operations of Five Axis Milling Machines*, Springer Science & Business Media, 2007.
15. Herskovits J.: *Advances in Structural Optimization*, Springer Science & Business Media, 2012.
16. Symulacja – definicja, synonimy, przykłady użycia, sjp.pwn.pl [dostęp 2018-01-02].
17. Forrester J.W., *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge, Mass, 1961.
18. Parnaby J., Concept of a manufacturing system, *International Journal of Production Research*, 20, 6, 1979, 123–134.
19. Edghill J.S., Towill D.R.: The use of system dynamics in manufacturing systems engineering, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 11, 4, 1989, 208–216.
20. Oyabride A., Baines T.S., Kay J.M., Ladbrook J.: Manufacturing Systems Modelling Using System Dynamics: Forming a Dedicated Modelling Tool, *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 2, 1, 2003, 71–87.
21. Serman J., *Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw-Hill, 2000.
22. Stadnicka D., Litwin P., Value stream and system dynamics analysis – an automotive case study. *Proc. CIRP*, 62, 2017, 363–368.
23. Litwin P., Jakiela J., Olech M., Dynamic simulation based optimization of information flow in extended enterprise and its impact on business partners production efficiency and stock replenishment, *Advances in manufacturing science and technology*, 40, 1, 2016, 33–45.

Praca zrealizowana w ramach projektu międzynarodowego ILA-LEAN „Innovative Learning Approaches for Implementation of Lean Thinking to Enhance Office and Knowledge Work Productivity”, 2016-2018. Numer projektu 2016-1-PL01-KA203-026293. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską z programu Erasmus +.



Erasmus+

Dr inż. Katarzyna ANTOSZ*

Dr inż. Dorota STADNICKA*

Dr inż. Paweł LITWIN

Dr inż. Ryszard PERŁOWSKI

Dr inż. Arkadiusz RZUCIDŁO

Prof. dr hab. inż. Jarosław SĘP

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska

35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 12,

tel./fax: (0-17) 8651452*, (0-17)8651521, (0-17)8651727, (0-17) 8651095, (0-17) 865 1512

e-mail: katarzyna.antosz@prz.edu.pl

dorota.stadnicka@prz.edu.pl

plitwin@prz.edu.pl

ryszard.perlowski@prz.edu.pl

arzuclidl@prz.edu.pl

jsztmiop@prz.edu.pl