

Edward MICHLOWICZ*, Bożena ZWOLIŃSKA*

BADANIA WPŁYWU WYTWARZANIA KOMPONENTÓW W GNIAZDACH NA PROCES MONTAŻU URZĄDZEŃ CHŁODNICZYCH

DOI: 10.21008/j.0239-9415.2017.072.11

Podejście systemowe pozwala zobaczyć przedsiębiorstwo produkcyjne jako złożony system urządzeń służących do wytwarzania i urządzeń pomocniczych. W podejściu procesowym to produkcja sprawia, że strumień materiałów przepływa przez poszczególne komórki o mieszanej strukturze w sposób dyskretny (w krokach). Czas przetwarzania jest inny na każdym etapie wytwarzania. Elementem łączącym poszczególne urządzenia produkcyjne są bufory (składowiska) międzyoperacyjne, które pełnią funkcje przechowywania półwyrobów wytwarzanych w obiekcie N i magazynu dostaw do następnej komórki (N + 1) lub do innego obiektu. Parametry etapów zależą od czasu obróbki i wielkości partii. Analizowany proces wytwarzania urządzenia chłodniczego ma strukturę gniazdową. Istotnym elementem produkcji jest odpowiednie planowanie wytwarzania potrzebnych komponentów i montażu, by czas wykonania zadania produkcyjnego był jak najkrótszy.

Słowa kluczowe: system produkcyjny, planowanie produkcji, struktura gniazdowa

1. WPROWADZENIE

Elementem wspólnym, łączącym różne podejścia do logistyki produkcji, są przepływy rzeczowe. Stąd pojawiają się nowe koncepcje i cele logistyki produkcji. Jako środek zaradczy służący eliminowaniu marnotrawstwa (*muda*) Womack i Jones (2008) zalecają „szczupłe” podejście, „szczupłe” myślenie (*lean thinking*), związane z tworzeniem strumienia wartości w przedsiębiorstwie. Dostęp do dużych przestrzeni powoduje gromadzenie zapasów, co prowadzi do powstawania nadmiernej produkcji w toku (*work in process – WIP*) (Lödding, 2013). W ujęciu pro-

* AGH w Krakowie.

ponowanym przez Rothera (Rother, Harris, 2007) najistotniejszym zadaniem systemów produkcyjnych jest zachowywanie ciągłości przepływów materiałów, a także permanentne doskonalenie (*kaizen*) ciągłości. W nawiązaniu do łańcuchów dostaw Nyhuis i Wiendhal (2009) stwierdzają, że podstawowy cel logistyki produkcji można określić jako osiągnięcie zdolności do zwiększenia dostaw oraz zapewnienie ich niezawodności przy możliwie najniższych kosztach logistyki i produkcji. Obecnie istnieje wiele metod i technik możliwych do wykorzystania w działalności produkcyjnej przedsiębiorstwa. Stąd też właściwy ich wybór (na potrzeby przedsiębiorstwa lub procesu) jest nieraz trudny. Wydaje się oczywiste, że z logistycznego punktu widzenia odpowiednie sterowanie strumieniem materiałów w systemie produkcyjnym powinno należeć do podstawowych zadań logistycznych. Pomocne mogą tu być wszelkie indywidualne rozwiązania przyczyniające się do poprawy produktywności procesów wytwarzania (Michłowicz, Smolińska, 2015). Przykładowo Nyhuis i Wiendhal (2009) na potrzeby analizowania prawidłowości przepływów materiałowych w procesach produkcyjnych zaproponowali dziewięć praw logistyki produkcji (PLP), które są uniwersalnymi stwierdzeniami opisującymi zależności między poszczególnymi parametrami procesu (Michłowicz, Smolińska, 2015).

W artykule jest rozważany problem odpowiedniego, zgodnego z planem wykonania zadania produkcyjnego w systemie *make-to-order*.

2. PROBLEMY PRZY WYTWARZANIU URZĄDZEŃ CHŁODNICZYCH

Przedmiotem rozważań jest firma zaliczana do grupy małych i średnich przedsiębiorstw (MSP). Obecnie jest w niej zatrudnionych około 250 pracowników, a wyroby firmy są dostarczane do ponad 30 krajów.

Firma wytwarza kilkadziesiąt rodzajów szaf, regałów i stołów chłodniczych, do których potrzebnych jest ponad 2000 różnych elementów i komponentów. Część elementów wytwarzana jest w przedsiębiorstwie, jednak pewną grupę komponentów i podzespołów dostarczają dostawcy zewnętrzni. Szczególnie ważnym produktem firmy są szafy chłodnicze wykorzystywane w medycynie, głównie do przechowywania krwi i preparatów krwiopochodnych. Urządzenia ULUF są produkowane w kilku odmianach, przy czym najbardziej złożony proces występuje podczas wytwarzania szafy ULUF 450.

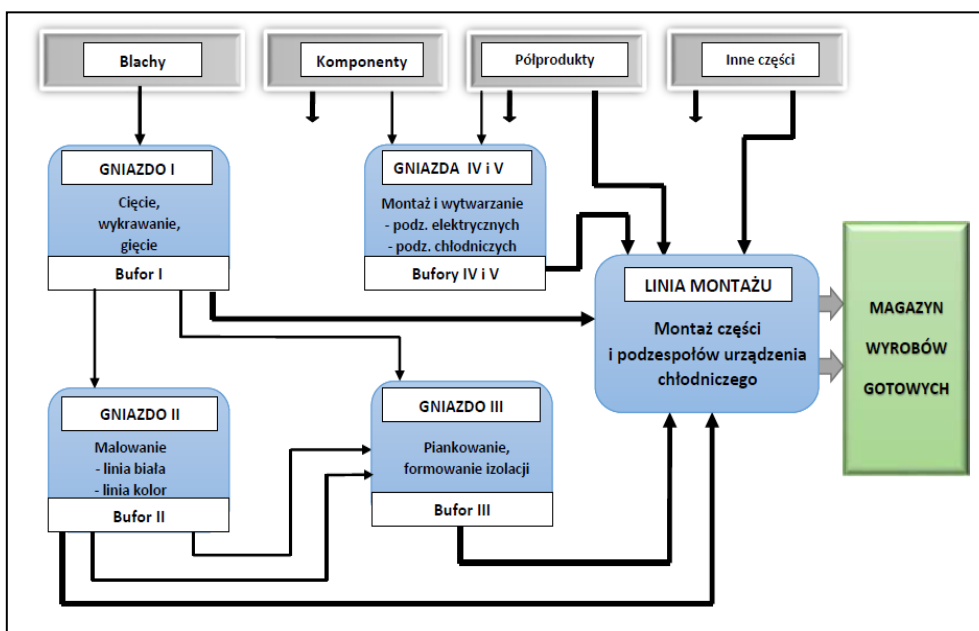
Jakość i bezpieczeństwo produktów są potwierdzone certyfikatem jakości dla wyrobów medycznych ISO 13485 (Systemy Zarządzania Jakością dla Wyrobów Medycznych) oraz znakiem CE0434 (dla urządzeń spełniających warunki Dyrektywy 93/42/EEC).

Urządzenie chłodnicze ULUF 450 składa się ze 165 elementów. Z tej liczby 114 (65%) jest wykonywanych w zakładzie, a 51 (35%) to elementy zamawiane.

Rocznie firma produkuje w systemie *make-to-order* średnio od 160 do 200 szaf, zamawianych głównie przez odbiorców szwedzkich.

2.1. Procesy w gniazdach produkcyjnych

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie strukturę produkcji szaf chłodniczych. Proces produkcji przebiega w pięciu gniazdach produkcyjnych, z których części, komponenty i podzespoły są przekazywane w odpowiednich momentach na główną linię montażu (rys. 1).



Rys. 1. Schemat procesu wytwarzania urządzeń chłodniczych

W gnieździe pierwszym są wykonywane operacje cięcia, wykrawania i gięcia elementów z blachy stalowej (nierdzewnej, ocynkowanej, powlekanej). Dodatkowo mogą wystąpić operacje spawania, zgrzewania i gratowania. Uzyskiwane półwyroby są przekazywane do bufora.

Gniazdo II jest wykorzystywane do prowadzenia procesów malowania elementów metalowych (większa część na kolor biały, część na inne kolory, pewna część produkcji z gniazda I nie podlega malowaniu).

Gniazda III, IV i V są typowymi gniazdami przedmiotowymi, przeznaczonymi do procesów piankowania (III – izolowanie niektórych przestrzeni pianką poliuretanową) oraz do przygotowania i montażu podzespołów elektrycznych (IV) i chłodniczych (V).

W niektórych gniazdach przewidziano bufory służące do składowania elementów potrzebnych w kolejnych operacjach. Gotowy wyrób – szafa chłodnicza – powstaje na linii montażu. Obecny takt produkcji szafy ULUF wynosi około 30 godzin, a montaż końcowy trwa ok. 3,5 godziny. Po zakończeniu wytwarzania szafa jest poddawana kontroli jakości, a następnie wielogodzinnemu testowaniu.

Modelowy przepływ materiałów przez urządzenia i magazyny (bufory) można opisać według tabeli 1 oraz rysunków 2 i 3 (Michłowicz, Smolińska, Zwolińska, 2015).

Tabela 1. Oznaczenie wielkości opisujących proces

Oznaczenie wielkości	Opis wielkości
$i, j = 1, 2, \dots, n$	kolejne numery urządzeń produkcyjnych UP, to znaczy ($i \in UP, j \in UP$)
$k = 1, 2, \dots, p$	numer partii materiału MT przepływającego między urządzeniami ($k \in MT$)
$s = 1, 2, \dots, st$	kolejny numer środków transportowych UT ($s \in UT$)
$m = 1, 2, \dots, ma$	numer magazynu MA ($m \in MA$)
$M_{ij}^w(k)$	moment wysyłki k-tej partii materiału z punktu i do punktu j
$M_{ij}^d(k)$	moment dostawy k-tej partii materiału wysłanego do punktu j z punktu i
$t_{ij}^s(k)$	sumaryczny czas cykli transportowych (załadunek, transport, wyładunek, powrót) k-tej partii materiału środkami transportu s od punktu i do punktu j
$\Delta t_{ij}^m(k)$	czas pobytu k-tej partii materiału w magazynie m, położonym między punktami i oraz j
$t_j(k)$	czas przejścia k-tej partii materiału przez punkt j (czas trwania obsługi partii k na urządzeniu j)
$t_{pj}^{(a)}$	czas przebrojenia urządzenia j na produkcję asortymentu (a)

Wielkościami opisującymi proces (zgodnie z tabelą 1) są:

- moment dostawy k-tej partii materiału z punktu i do punktu j dany jest równaniem:

$$M_{ij}^d(k) = M_{ij}^w(k) + t_{ij}^s(k) + \Delta t_{ij}^m(k) \quad (1)$$

- moment wysyłki k-tej partii materiału z punktu i do punktu j:

$$M_{ij}^w(k) = M_{i-1,j}^d(k) + t_i(k) \quad (2)$$

– moment wysyłki k-tej partii materiału z punktu j do punktu l:

$$M^{w,j,l}(k) = M^{d,i,j}(k) + t_j(k) \quad (3)$$

Powinno się rozważyć dwa przypadki (buforowanie materiału przed urządzeniem produkcyjnym i postój wymuszony urządzeniem produkcyjnego).

Przypadek 1 (buforowanie materiału)

Jeśli

$$M^{d,i,j}(k) < M^{w,j,l}(k-1) \quad (4)$$

czyli jeśli moment dostawy k-tej partii materiału do urządzenia produkcyjnego j jest wcześniejszy od momentu wysyłki poprzedniej ($k-1$) partii materiału z urządzenia j do urządzenia produkcyjnego l, to materiał przed urządzeniem j jest magazynowany przez okres $\Delta t_{m,i,j}(k)$.

Przypadek 2 (postój urządzenia)

Jeśli

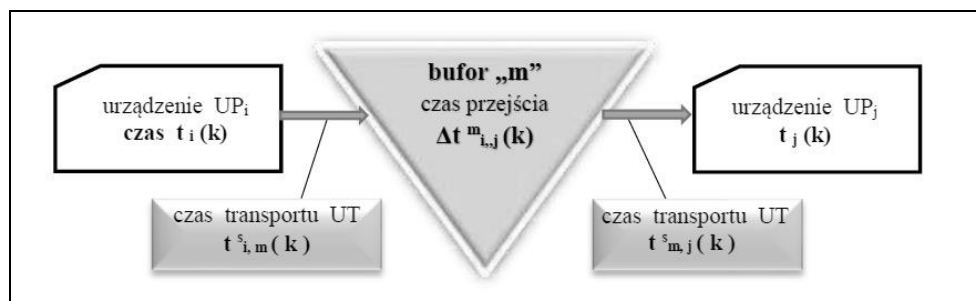
$$M^{d,i,j}(k) > M^{w,j,l}(k-1) \quad (5)$$

czyli jeśli moment dostawy k-tej partii materiału do urządzenia produkcyjnego j jest późniejszy od momentu wysyłki poprzedniej ($k-1$) partii materiału z urządzenia j do urządzenia produkcyjnego l, to urządzenie j oczekuje (jest w stanie „postoju”) przez okres $\Delta t_j(k)$.

Przepływ materiałów przez urządzenia i magazyny (bufory) przedstawiono na rysunkach 2 (urządzenia produkcyjne – UP) i 3 (urządzenia transportowe – transport materiału do urządzenia produkcyjnego poprzez bufor).



Rys. 2. Schemat przepływu materiału przez urządzenie produkcyjne UP



Rys. 3. Schemat przepływu materiału przez magazyn

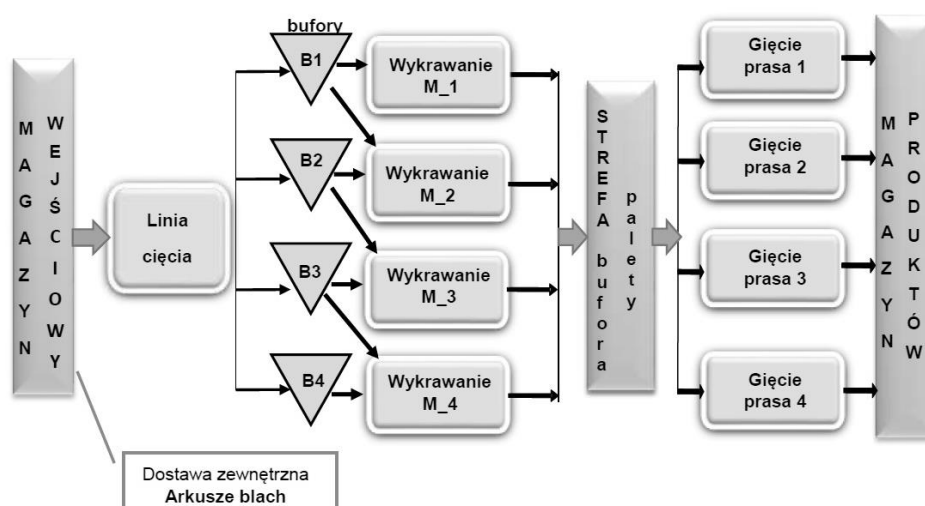
Sumaryczny czas transportu z wykorzystaniem urządzenia UT:

$$t^s_{ij}(k) = t^s_{i,m}(k) + t^s_{m,j}(k) \quad (6)$$

Przedmiotem dalszej analizy jest część linii produkcyjnej złożonej z dziewięciu maszyn w układzie mieszanym – szeregowo-równoległym (rys. 4).

2.1. Procesy przygotowania elementów metalowych z blach

Na rysunku 4 przedstawiono podstawowe procesy i urządzenia stosowane przy wytwarzaniu metalowych elementów, które są wykorzystywane w dalszych procesach produkcji urządzeń chłodniczych. Model składa się ze stanowisk wytwórczych oraz buforów (magazynów) międzyoperacyjnych.



Rys. 4. Struktura procesu wytwarzania elementów z blach

W tabeli 2 zestawiono przykładowe oznaczenia i rodzaje blach najczęściej używanych przy wytwarzaniu komponentów metalowych.

Tabela 2. Przykładowe oznaczenia blach wejściowych

Indeks	Rodzaj blachy
10001002	blacha ocynkowana ogniowo DX51D+Z275 0.5X1250MM
10001004	blacha ocynkowana ogniowo DX51D+Z275 0.8X1250MM
10001005	blacha ocynkowana ogniowo DX51D+Z275 1.0X1250MM
10001006	blacha ocynkowana elektrolitycznie DC01+ZE50/50 1.5X1000MM
10001007	blacha ocynkowana ogniowo DX51D+Z100MBC 2.0X1000MM
10002006	blacha lakierowana RAL9016 FOLIA/PU 0.5X1151MM
10003001	blacha nierdzewna H17 gat. 1.4016 LUSTRO KRAĞ 0,8x 755
10005003	blacha nierdzewna H18 gat. 1.4301 SZLIF FOLIA KRAĞ 0,8x 1250
10005004	blacha nierdzewna H18 gat. 1.4301 SZLIF FOLIA KRAĞ 1,0x 1250

Ze względu na złożoność procesu oraz dużą liczbę potrzebnych komponentów sporządzenie wartościowego zestawienia, w którym jednoznacznie przypisuje się do procesu (lub urządzenia) potrzebne do przetwarzania surowce, części, komponenty, półwyroby z zewnątrz (wg *Bill of Materials*) jest zadaniem trudnym. Zatem zaproponowano sporządzenie mapy, na której odpowiednie elementy materiałowe są przypisane do właściwych procesów lub urządzeń. Na rysunku 5 ukazano przykładowe połączenia listy elementów zawarte w zestawieniu materiałów BOM.



Rys. 5. Przykładowe połączenia z listy elementów zawartych w zestawieniu BOM

W celu prawidłowego odzwierciedlenia parametrów pracy układu w symulatorze Witness należało zebrać następujące dane:

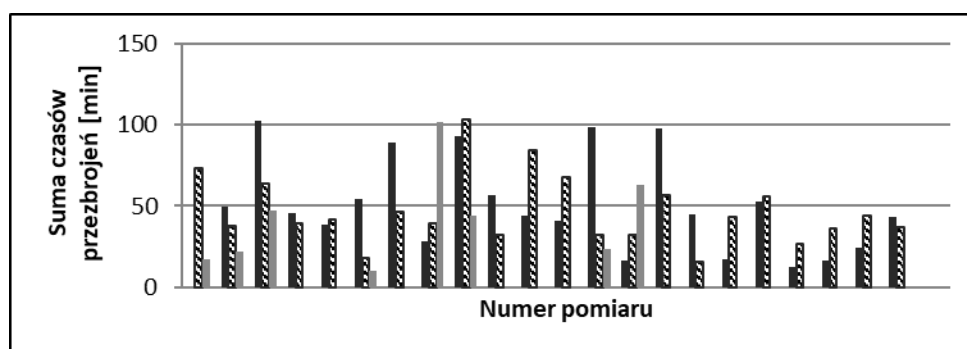
- czasy trwania cykli operacji (C/T),
- czasy przygotowawczo-zakończeniowe (t_{pz}),
- czasy przebrojeń (C/O),
- czasy trwania awarii, usterek i przestojów (t_a),
- czas pracy netto (t_{netto}) dla każdej zmiany,
- średni czas przeznaczony na utrzymanie porządku na stanowisku oraz wypełnianie raportów (t_{ss}).

Procesy technologiczne stosowane w produkcji są złożone (Zwolińska, 2015), a zatem struktura poszczególnych obiektów wytwarzających półwyroby i wyroby finalne wymaga odpowiednich powiązań wymuszanych strumieniem przepływającego materiału.

Ze względu na bardzo duże zróżnicowanie komponentów produkcyjnych ważne było również określenie parametrów wydajności stanowisk. Przykładowo na etapie wykrawania w czasie jednej zmiany wytwarzanych jest około 2000 półproduktów z różnych rodzajów blach o wymiarach od kilku centymetrów do czterech metrów. Różnorodność ta wpływała na zmienność wszystkich wymienionych czasów. Przy tak dużym zróżnicowaniu parametrów (rodzajów, liczb i czasów) w symulacji wykorzystano szereg zmiennych określonych różnymi rozkładami statystycznymi. Wybór rozkładu oparto na analizach danych zgromadzonych w okresie jednego miesiąca.

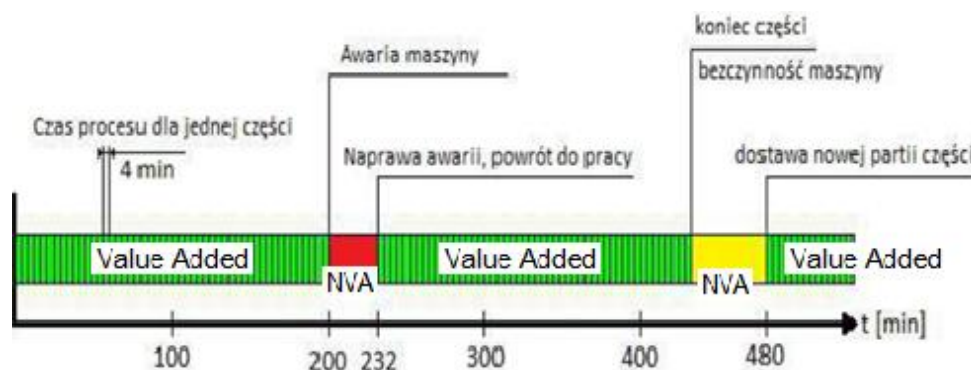
W analizach wykorzystano symulator obiektowy WITNESS 13.

Planowany czas przebrojeń na zmianę został ustalony po analizie wszystkich czasów przebrojeń, które zostały zarejestrowane w określonym czasie. Zestawienie wszystkich sum czasów przebrojeń wykonywanych na poszczególnych zmianach przedstawiono na rysunku 6 (kolor czarny – zmiana 1, kolor kreskowany – zmiana 2, kolor szary – zmiana 3).



Rys. 6. Zestawienie czasów przebrojeń w okresie obserwacji

W wyniku analiz otrzymano harmonogram pracy każdej z dziewięciu maszyn. Na rysunku 7 zaznaczono czynności dodające wartość (VA – *value added* oraz niedodające wartości (NVA – *non value added*).



Rys. 7. Harmonogram czasu pracy, awarii i blokady stanowiska

Procesy w analizowanym systemie mają charakter dyskretny. Jednak ze względu na dużą różnorodność asortymentu wyjściowego przepływy charakteryzują się wysokim wskaźnikiem zmienności. Trudno jest we względnie długim czasie uzyskać jednakowe stany układu produkcyjnego. Ponadto oferowana przez firmę duża liczba dostępnych opcji indywidualnego wyboru wersji urządzenia przez klienta wpływa na częste zmiany nie tylko samego procesu wytwórczego, ale również projektu na etapie konstrukcyjnym.

2.3. Planowanie – przygotowanie map całego procesu

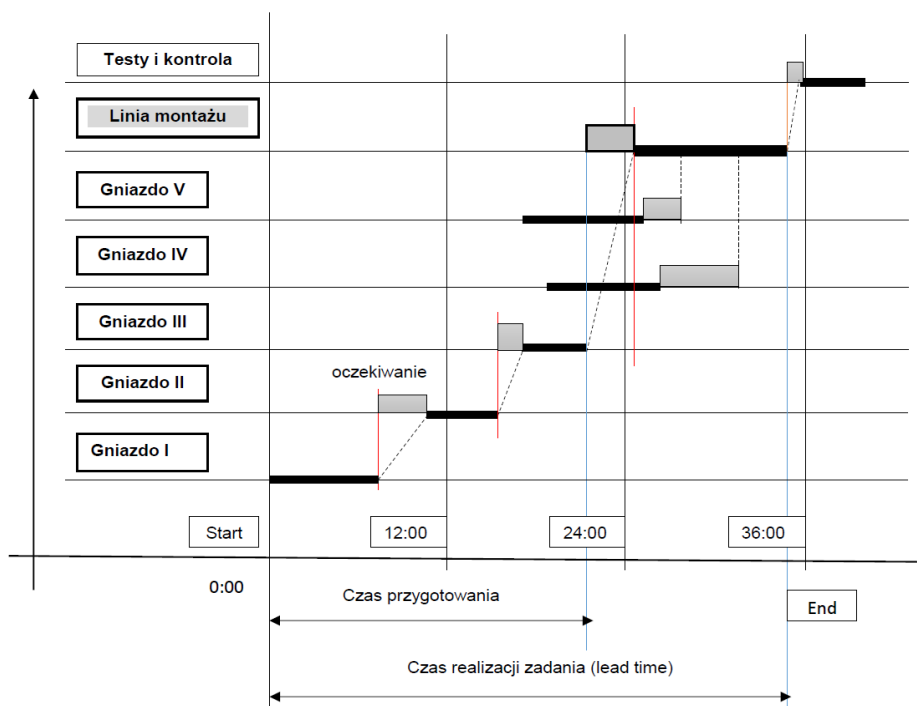
Ponieważ na każdym stanowisku wykonuje się wiele innych zleceń (inne szafy chłodnicze, a także stoły i regały), zadanie odpowiedniego planowania procesów w poszczególnych gniazdach i na poszczególnych urządzeniach jest złożone i trudne. Na rysunku 8 przedstawiono teoretyczny harmonogram przygotowania elementów, montażu końcowego i kontroli jakości wykonanego urządzenia. Kontrola obejmuje także 24-godzinny test poprawnego funkcjonowania, a średni czas wykonania zadania produkcyjnego wynosi około 36 godzin.

W wyniku przeprowadzonych badań zidentyfikowano w procesie produkcyjnym pewne przestoje, których najważniejsze przyczyny to:

- opóźnienie dostaw komponentów zewnętrznych (17% – dane z 2015 r.),
- zła jakość dostaw (26% – jest to wartość odnosząca się głównie do blach z uszkodzeniami mechanicznymi),

- brak niewłaściwej korelacji harmonogramów produkcji w gniazdach z harmonogramem montażu; ten rodzaj opóźnień jest przyczyną największych kosztów, ponieważ opóźnienia występują w końcowym etapie, tj. podczas montażu wyrobu finalnego.

Pozostałe opóźnienia wynikają z braków jakościowych na różnych etapach wytwórczych; najczęściej są to wady powłoki lakierniczej.



Rys. 8. Teoretyczny harmonogram planowania produkcji

W firmie na każdym etapie występuje nadprodukcja, a zatem wady te nie powodują dużego opóźnienia dostaw do klientów (ale są przyczyną wzrostu kosztów!).

Wymienione powyżej problemy należy minimalizować, ponieważ są przyczyną zjawiska określanego jako *muda*.

W celu skrócenia czasu wykonania zadania muszą być podjęte następujące działania:

- standaryzacja stanowisk (wdrożenie zasad 5S),
- chronometraż operacji w kolejnych gniazdach produkcyjnych,
- chronometraż przebrojeń (ewentualna propozycja wykorzystania metody SMED do skrócenia czasu przebrojenia).
- sporządzenie harmonogramów planowania produkcji dla każdego gniazda,

- wyznaczenie strumienia wartości i jego zobrazowanie w postaci mapy VSM dla stanu bieżącego oraz propozycje zmian i budowa mapy stanu przyszłego.

3. PODSUMOWANIE

Głównym celem przeprowadzonych analiz była minimalizacja czasu wykonania zadania produkcyjnego – *lead time* – od momentu wprowadzenia materiału do rozpatrywanego podsystemu do momentu wykonania urządzenia. Drugim celem jest maksymalizacja wykorzystania czasu pracy maszyn, a także skrócenie czasu trwania przebrojeń i napraw. Istotnym ograniczeniem wynikającym z zapotrzebowania na części metalowe z blach jest wymagana minimalna wielkość produkcji tych komponentów (około 2000 elementów gotowych na jedną zmianę).

Liczba kręgów blach dostarczanych z magazynu wejściowego na początek linii produkcyjnej jest istotnie zależna od rodzaju blachy. Gdy partie materiału na wejściu są zbyt duże, następuje szybkie wypełnianie się przestrzeni magazynowej za stanowiskiem rozkroju blach oraz konieczne jest składowanie zapasów przez dłuższy czas. Aby uniknąć magazynowania dużych ilości blachy na początku procesu produkcji, zmniejszono oraz ujednolicono wielkość partii do czterech kręgów dostarczanych co trzy zmiany. Wraz z ograniczeniem wielkości partii na wejściu znacząco zmniejszył się poziom wykorzystania maszyn, w szczególności wykrawarek, i stanowiska do rozkroju blach. Aby utrzymać wykorzystanie czasu pracy na dotychczasowym poziomie oraz w celu minimalizacji kosztów zredukowano liczbę wykrawarek na linii z czterech do trzech. Zaproponowano zatrzymanie eksploatacji stanowiska najbardziej awaryjnego (wykrawarka 500).

Wraz z redukcją liczby wykrawarek uległ zmianie system kolejkowania poboru elementów na stanowiskach krawędziowania. Badana linia produkcyjna po wprowadzeniu zmian wytwarza w czasie jednej zmiany 2290 elementów gotowych, a więc z niewielką nadwyżką spełnia warunek minimalnej produkcji 2000 elementów na zmianę produkcyjną. Ponadto została utrzymana ogólna wydajność całego układu bez blokowania stanowisk, których powodem było przepełnienie buforów. Wątpliwości związane z usunięciem najmniej wydajnej wykrawarki były spowodowane obawą, że zmniejszy się wydajność na tym etapie. Jednak w wyniku zmiany kolejkowania na wejściu systemu oraz skrócenia czasów przebrojeń uzyskano produktywność na tym samym, wymaganym poziomie przy zmniejszeniu zapasów w buforach międzyoperacyjnych (wykrawarki – krawędziarki).

Bardziej widoczny efekt poprawy produktywności wytwarzania urządzeń chłodniczych w omawianej firmie wymaga kolejnych analiz i zmian w następnych elementach struktury (m.in. w gniazdach malowania i piankowania).

LITERATURA

- Lödöding, H. (2013). *Handbook of Manufacturing Control. Fundamentals, Description, Configuration*. Berlin–Heidelberg: Springer Verlag.
- Nyhuis, P., Wiendhal, H.P. (2009). *Fundamentals of Production Logistics. Theory, Tools and Applications*. Berlin–Heidelberg: Springer Verlag.
- Michlowicz, E., Smolińska, K. (2015). Research on the flow of material in production logistics. *Research in Logistics & Production*, 5, 1, 21-31.
- Michlowicz, E., Smolińska, K., Zwolińska, B. (2015). Logistics engineering in a production company. *Research in Logistics & Production*, 5, 5, 503-513.
- Michlowicz, E., Smolińska, K. (2015). The impact of modernization on the productivity of a multi-stage production of transformer sheets. In: *Conference Proceedings of 24th International Conference on Metallurgy and Materials METAL*. Brno: Tanger, 1720-1726.
- Rother, M., Harris, J. (2007). *Creating Continuous Flow*. Wrocław: Lean Enterprise Institut Poland.
- Womack, J.P., Jones, D.T. (2008). *Lean thinking. Banish waste and create wealth in your corporation*. Wrocław: ProdPress.com.
- Zwolińska, B., Smolińska, K. (2015). Use of Witness simulation for improving the continuity of the flow. In: *Conference Proceedings Carpathian Logistics Congress*. Jesenik: Tanger, 485-490.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF CELLULAR MANUFACTURING ON THE ASSEMBLY OF REFRIGERATING APPLIANCES

Summary

A systemic approach allows to see the production enterprise as a complex system of production and auxiliary facilities. In the process approach, it is manufacturing that makes the stream of materials flow through individual production cells in a mixed (serial – parallel) system, in a discreet way (in steps). Processing times are different at each stage. The element that connects the individual production facilities is buffer storage, which functions as a storage site for semi-finished goods departing from facility N or a delivery warehouse for the next site (N + 1) or to another station. The steps' parameters depend on the processing time and batch size. The analyzed plant consists of 9 stations and buffers (warehouses). The process of manufacturing the refrigerating appliance has a cellular layout. An important part of production is the proper scheduling of production of the necessary components and assembly, so that the time of realization of the production task is as low as possible.

Keywords: production system, production schedule, cellular manufacturing