

Symulacja wydajności procesu produkcyjnego – studium przypadku

JEL: L91 DOI: 10.24136/atest.2018.520

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule omówione zostały możliwości zastosowania symulacji komputerowej do analizy wybranego procesu produkcyjnego. Badania przeprowadzono w oparciu o dane z zakładu produkującego pakiety szybowe z gotowych formatek szklanych. W symulacji uwzględniono dostępność maszyn i średni czas napraw dla poszczególnych maszyn. Zaprezentowano przykładowy model i przeanalizowano różne rozwiązania organizacyjno-logistyczne. Przeprowadzone symulacje pozwoliły na bezpośrednią identyfikację obszarów zwiększenia wydajności. Wskazano na rozwiązanie pozwalające na osiągnięcie największej wydajności procesu.

Słowa kluczowe: symulacja, proces produkcyjny, wydajność

Wstęp

Symulacje komputerowe to jeden z filarów koncepcji Przemysł 4.0. Modelowanie i symulacja komputerowa pozwalają na komputerowe odzwierciedlenie rzeczywistego systemu, na którym przeprowadza się różne eksperymenty. W wyniku tych eksperymentów otrzymuje się zestaw danych, dzięki którym można podjąć dalsze decyzje, np. dotyczące formy organizacyjnej stanowisk produkcyjnych czy wielkości buforów, tak aby otrzymać założony efekt (skrócenie czasu produkcji, zwiększenie wydajności). Na badanym modelu można przeprowadzać kolejne symulacje zmieniając dane wejściowe, ustawienia maszyn, stanowiska oraz go udoskonalać. Modelowanie stosuje się, gdy uzyskanie rozwiązania metodami analitycznymi jest trudne lub niemożliwe, a eksperymentowanie na rzeczywistym modelu jest zbyt pracochłonne lub kosztowne [4]. Modelowanie procesów jest obecnie najskuteczniejszym narzędziem służącym poznaniu i obrazowaniu zjawisk gospodarczych [11]. Dynamicznie zmieniające się otoczenie przedsiębiorstw oraz ciągła walka konkurencyjna wymusza znajdowanie rozwiązań najlepiej wpisujących się w potrzeby rynku [2]. W obecnych czasach firmy muszą dostosowywać się do zmieniających się warunków i wymagań klientów. Skracają się cykle życia wyrobów i występuje konieczność częstego uruchamiania nowych produkcji. Firmy muszą być elastyczne, a jednocześnie utrzymywać koszty na odpowiednim poziomie i szybko reagować na zmieniające się zapotrzebowanie klienta [12].

Na rynku istnieje ogromny wybór dedykowanego oprogramowania symulacyjnego umożliwiającego modelowanie i testowanie działania systemów produkcyjnych oraz logistycznych [6].

Do analizy wybrano oprogramowanie Tecnomatix Plant Simulation [1]. Jest to rozbudowany program o rozległym zastosowaniu od planowania produkcji pojedynczych części, poprzez optymalizację istniejących linii, aż po projektowanie całych hal produkcyjnych. Najważniejszymi rozwiązaniami oferowanymi przez program są:

- planowanie i walidacja produkcji części maszyn – możliwość ustalenia czasu trwania operacji, wymaganych zasobów ludzkich, potrzebnych zasobów materiałowych i ułożenia sekwencji operacji,
- planowanie i walidacja montażu – możliwość przeprowadzania analizy różnych procesów montażowych bez wprowadzania zakłóceń w istniejących rozwiązaniach,

- planowanie i wdrażanie automatyzacji,
- projektowanie oraz optymalizacja procesów wytwórczych – główne narzędzie programu Tecnomatix Plant Simulation, dzięki możliwości wizualizacji oraz, tworzeniu raportów oraz generowaniu wykresów daje możliwość oceny funkcjonalności zmian w produkcji,
- zarządzanie jakością – możliwa jest łatwiejsza analiza przyczyn problemów jakościowych oraz porównanie rzeczywistych problemów i ich modeli matematycznych.

Komputerowy model symulacyjny umożliwia przeprowadzanie eksperymentów oraz poszczególnych scenariuszy działania bez konieczności ingerencji w istniejący system, bądź też wykorzystanie doświadczeń na modelu w procesie planowania, na długo przed fizycznym powstaniem modelu rzeczywistego [10]. Przeprowadzone eksperymenty symulacyjne dostarczają danych i informacji o procesach, które pomagają podjąć najlepsze decyzje [8].

Symulowanie procesu funkcjonowania linii, gniazd i całych systemów produkcyjnych na etapie ich planowania niesie ze sobą szereg korzyści. Umożliwia również analizę istniejących linii wytwórczych [5]. Maksymalna możliwa produktywność całego systemu jest uwarunkowana m.in. jego wydajnością [3].

Należy jednak pamiętać, iż budowa modeli symulacyjnych ma też swoje ograniczenia związane z pracochłonnością, a co za tym idzie kosztownością modelowania systemów produkcyjnych [9].

1. Proces produkcji szyb hartowanych

Badania przeprowadzono w oparciu o rzeczywiste dane z zakładu produkcyjnego zlokalizowanego w województwie małopolskim. Analizie poddano proces produkcji pakietów szybowych z gotowych formatek szklanych. Proces ten składa się z kilku etapów, tj. [13]:

- cięcie szkła na określone formatki,
- krawędziowanie,
- nanoszenie znaku producenta,
- mycie,
- hartowanie.

Poniżej scharakteryzowano krótko każdy z etapów analizowanego procesu.

1.1. Ciecie szkła

Etap ten odbywa się przy wykorzystaniu szkła w formacie jumbo (6700 mm x 3300 mm). Linie do rozkroju szkła w analizowanym zakładzie produkcyjnym tworzą trzy maszyny: stół załadowniczy, stół do rozkroju szkła i stół łamiący. Dwustronny stół załadowniczy jest automatyczną ładowarką pobierającą tafle z pionowego stojaka przez hydrauliczne ramiona załadunkowe. Układ hydrauliczny sterowany jest przez sterownik PLC, a dzięki zaworom proporcjonalnym uzyskuje się płynny ruch ze zmienną prędkością zmniejszając tym samym ryzyko uszkodzenia formatek. Stół do automatycznego rozkroju szkła służy do prostego cięcia gładkich tafli szkła oraz do wycinania kształtów z dużą szybkością i precyzją. Stół ten może pracować w jednej linii wraz ze stołem do rozkroju i stołem do łamania. Po tych operacjach szkło podawane jest na kolejny stół, gdzie jest ręcznie łamane na poszczególne formatki i sortowane według danych z systemu zarządzającego produkcją [13].

1.2. Krawędziowanie szkła

Zgodnie z normą PN-EN 12150.1:2015-11 szkło przed hartowaniem powinno być „zatepione”. Operację tą wykonuje się na szlifierkach krzyżowych pasowych. Szlifierka wyposażona jest w stół z kulkami ułatwiającymi obracanie szkła. Zmiana parametrów obróbki, tj. nadatku ustawiana jest ręcznie. Szybkość „zatepiania” krawędzi zależy od grubości szkła i pożądanej jakości krawędzi.

1.3. Nanoszenie znaku producenta

Do nadruku używana jest znakowarka laserowa. Na szybach nadrukowany jest np. logotyp firmy. Prędkość znakowania wynosi 7000 mm/s, minimalna szerokość linii to 0.01 mm, a minimalna wielkość znaku to 0.15 mm. Urządzenie jest bardzo dokładne, tj. na poziomie 0.003 mm. Z urządzeniem współpracuje stół z kulkami umożliwiającymi przesuwanie i obracanie szkła.

1.4. Mycie szkła

Przed etapem hartowania szkło powinno zostać dokładnie umyte. W przypadku omawianego przedsiębiorstwa za ten etap procesu odpowiada tzw. myjka pozioma przeznaczona do mycia jakościowego.

1.5. Hartowanie szkła

Końcowym etapem analizowanego procesu jest hartowanie. Odbywa się ono w piecu hartowniczym. Piec składa się z kilku podstawowych elementów, takich jak [13]:

- System załadunku i rozładunku, którego podstawą jest stalowa rama, do której przymocowane są roleki. Prędkość rolek kontrolowana jest niezależnie przez falownik. System wyposażony jest również w komplet foto-czujników mierzących długość każdej tafli szkła. Na podstawie odczytu z czujników ustawiany jest zakres oscylacji tafli w piecu oraz miejsce zatrzymania w strefie rozładunku;
- Piec grzejny - składa się z pojedynczych sekcji, dzięki czemu można go łatwo rozbudować. Na wlocie i wylocie posiada pneumatycznie unoszone drzwi;
- Wałki i napędy wykonane z tlenku krzemu lub ceramiki;
- System grzejny, składający się z krętek grzejnych połączonych w oddzielne sekcje. Każda sekcja posiada niezależny pomiar temperatury i jest niezależnie załączana;
- System chłodzący, który składa się ze strefy przelotowej i strefy niskiego ciśnienia. System nadmuchu to dwa układy dysz zamontowanych naprzeciwko siebie;
- Strefa przejścia, czyli pierwsza strefa chłodzenia. Złożona z dmuchaw wysokiego ciśnienia i dmuchaw sprężonego powietrza. Przez tą strefę tafle przechodzą bez oscylacji;
- Strefa niskiego ciśnienia – w tej strefie tafle oscyluje aż do zahartowania i schłodzenia. System ten zamontowany jest na konstrukcji niwelującej drgania.

2. Model procesu produkcyjnego

W celu utworzenia modelu procesu produkcyjnego zebrano odpowiedniej jakości informacje i dane wejściowe obejmujące m.in.:

- informacje o obiektach (rodzaj i liczba maszyn, rozmieszczenie stanowisk),
- wydajność systemu (plan produkcyjny, wielkość partii),
- liczba i pojemność magazynów,
- wymagania procesu technologicznego.

Proces produkcyjny obejmuje szyby hartowane w rozmiarze 650 x 900 mm. Jedna tafła jumbo daje możliwość wycięcia maksymalnie 35 szyb, dlatego czas pracy maszyn podano w odniesieniu dla całej partii szyb. Tab. 1 przedstawia czasy obróbki partii produktu na poszczególnych etapach produkcji.

Tab. 1. Czasy poszczególnych etapów procesu [13]

Lp.	Etap procesu produkcyjnego	Czas [min]
1	Cięcie/Rozkrój szkła (CI)	10
2	Krawędziowanie szkła (KR)	35
3	Nadruk (NA)	5
4	Mycie szkła (MY)	10
5	Hartowanie szkła (HA)	10

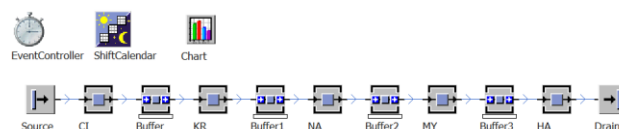
Dodatkowo w symulacji uwzględniono rzeczywiste dane dotyczące dostępności maszyn i średniego czasu napraw dla poszczególnych maszyn (tab. 2).

Tab. 2. Czasy napraw [13]

Lp.	Etap procesu produkcyjnego	Średni czas napraw [min]	Dostępność [%]
1	Maszyna do rozkroju	25	95
2	Szlifierka krzyżowa	15	97
3	Laser do nadruku	5	98
4	Myjka	10	85
5	Piec do hartowania	180	95

Długi czas naprawy pieca do hartowania wynika z konieczności odczekania do całkowitego wystygnięcia pieca przed naprawą.

Zebrane dane pozwoliły na utworzenie uproszczonego modelu procesu produkcyjnego (rys. 1). Za każdym stanowiskiem zaprojektowano magazyn buforowy.



Rys. 1. Model procesu produkcyjnego

Głównym celem symulacji była analiza możliwości zwiększenia wydajności produkcji w badanym procesie. Ponadto założono, iż prowadzone symulacje uwzględnią rozwiązania, które są możliwe do wdrożenia w istniejącym przedsiębiorstwie.

Dla poprawności przebiegu analizy przyjęto, że w przypadku resetowania symulacji i rozpoczęcia jej od nowa, zostaną usunięte wszystkie pozostałe na maszynach lub magazynach buforowych elementy, a informacje na temat pracy i dostępności maszyn wyzerowane.

Przeprowadzone symulacje obejmują produkcję tylko jednego typu wyrobu, dlatego nie uwzględniono czasów przebrożeń. Jedynym wyjątkiem, w którym zaimplementowano czas przebrożenia jest myjka, ponieważ zgodnie z wymaganiami procesu, zbiorniki z wodą należy ponownie napełniać co 10 partii produktu.

Pierwszą symulację przeprowadzono w okresie jednej zmiany roboczej (6:00-14:00), w czasie której obowiązuje 30-minutowa przerwa. Po uruchomieniu symulacji sprawdzono liczbę partii wyrobu, która trafiła do magazynu. Po ośmiu godzinach pracy wykonano 12 partii produktu, czyli 420 formatek szklanych. Średnia wydajność wyniosła 52,5 sztuki na godzinę. Wyniki symulacji pozwoliły ocenić także dane obejmujące: czas, w którym maszyny pracowały, czas, w którym maszyny były zablokowane (poprzez pracującą następną maszynę i pełne magazyny buforowe), czas w jakim oczekiwały na surowiec, czas przebrożenia oraz czas awarii. Wyniki pierwszej symulacji zestawiono w tab. 3. Uzyskane wyniki wskazują, które urządzenia są cały czas w użyciu, a które zbyt długo oczekują na pracę. „Wąskim gardłem” procesu jest etap krawędziowania. Długi czas obróbki partii na tym etapie powoduje znaczny spadek wykorzystania pozostałych maszyn znajdujących się w tym czasie w stanie bezczynności. Wartości te stanowiły punkt odniesienia dla dalszych symulacji.

Tab. 3. Wyniki symulacji I [13]

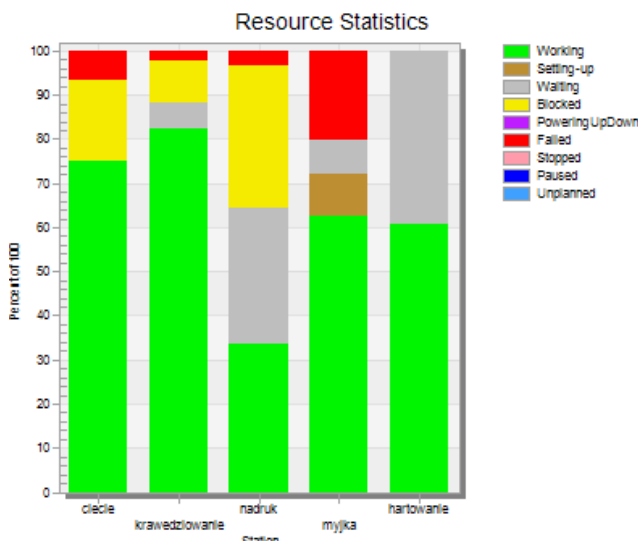
	Wykonywanie pracy [%]	Oczekiwanie [%]	Zablokowanie przez następne procesy [%]	Przezbieranie [%]	Awaria [%]
Maszyna do rozkroju	32,28	0,00	61,18	0,00	6,55
Szlifierka krzyżowa	95,82	2,08	0,00	0,00	2,10
Laser do nadruku	13,53	83,23	0,00	0,00	3,25
Myjka	25,00	48,67	0,00	6,25	20,08
Piec do hartowania	25,00	75,00	0,00	0,00	0,00

Celem kolejnych symulacji była optymalizacja analizowanego procesu pod kątem zwiększenia wydajności produkcji w określonym czasie. Przeanalizowano kilka scenariuszy produkcji, które objęły: zmiany w parku maszynowym, zmiany organizacyjne, zwiększenie liczby stanowisk. Porównano wydajność oraz obciążenie stanowisk (prace maszyn) w ramach każdej symulacji.

3. Wyniki

3.1. Zmiany w parku maszynowym

W pierwszym kroku analizy odniesiono się do zidentyfikowanego „wąskiego gardła” procesu jakim jest etap krawędziowania. Wpływ „wąskiego gardła” na cały proces można zniwelować poprzez „przyspieszenie” tej czynności, bądź zakup kolejnej maszyny. Zwiększenie magazynu buforowego pomiędzy maszyną do cięcia, a maszyną do krawędziowania nie wpłynęłoby na tempo produkcji, a ponadto nie byłoby zgodne z zasadami Lean Manufacturing, które są wdrażane w zakładzie. Z uwagi na wymagania procesu przyspieszenie obróbki na tym etapie nie było możliwe, stąd rozważono dołożenie dodatkowej szlifierki pasowo-krzyżowej. Szlifierki zostały ustawione obok siebie, tak aby nie był potrzebny dodatkowy transport z maszyny do rozkroju szkła. Po uwzględnieniu dodatkowej maszyny sprawdzono wydajność całego procesu. Uzyskane wyniki wskazują na wzrost wydajności do 23 szt. przy czym „wąskie gardło” w procesie nie zostało zlikwidowane.



Rys. 2. Wyniki symulacji II [13]

W istniejącym modelu uwzględniono zatem trzecią szlifierkę o tych samych parametrach. Wprowadzenie trzeciej szlifierki spowodowało wzrost wydajności produkcji do 29 partii.

Jak można zauważyć (rys. 2) znacząco wzrósł procentowy udział pracy każdej z maszyn. Oznacza to lepsze wykorzystanie posiadanych zasobów dążące do zwiększenia produkcji. Parametr, który zwraca uwagę to duży udział awarii w pracy myjki. Na powyższym wykresie widać, że myjka blokuje trzy wcześniejsze stanowiska. Tab. 4 przedstawia dokładne wyniki obciążenia stanowisk roboczych dla tego scenariusza.

Tab. 4. Obciążenie w wyniku zmian w parku maszynowym [13]

	Wykonywanie pracy [%]	Oczekiwanie [%]	Zablokowanie przez następne procesy [%]	Przezbieranie [%]	Awaria [%]
Maszyna do rozkroju	75,00	0,00	61,18	0,00	6,55
Szlifierka krzyżowa	82,38	5,85	0,00	0,00	2,10
Laser do nadruku	33,69	30,68	0,00	0,00	3,25
Myjka	62,50	7,69	0,00	9,73	20,08
Piec do hartowania	60,70	39,22	0,00	0,00	0,00

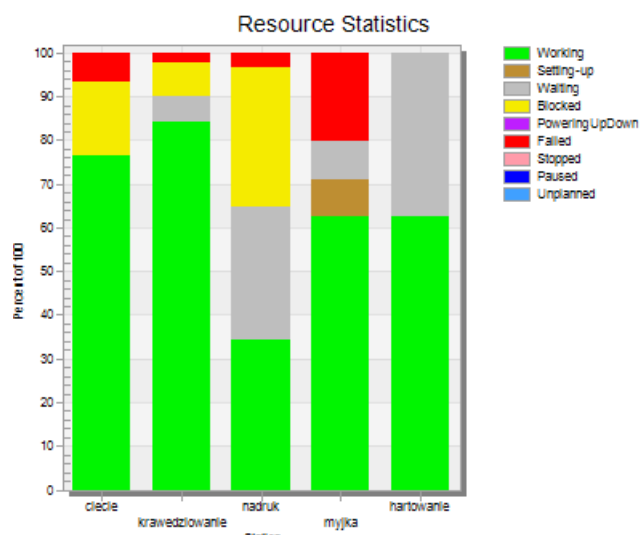
Analizując powyższą tabelę można zauważyć znaczną poprawę w wykorzystaniu maszyn w porównaniu do czasu, w którym oczekują one na pracę. Dodatkowo, wyniki symulacji wskazują na wysoką awaryjność myjki i wpływ tych awarii na cały proces.

3.2. Analiza pracy myjki

W przypadku myjki duży wpływ na poprawną pracę ma jakość wody, a także utrzymanie maszyny w czystości. Zgodnie z metodą Total Productive Maintenance (TPM) celem optymalizacji produkcji powinno być zmniejszanie czasów usterek w istniejącym procesie i sukcesywne dążenie do ich wyeliminowania. Pierwszy filar filozofii TPM to autonomiczne utrzymanie produkcji. Autonomiczne utrzymanie opiera się na wiedzy operatorów na temat maszyn, przy których pracują. To operator jest w stanie wykryć pierwsze objawy nieprawidłowej pracy maszyny, zwolnienie jej pracy, zmniejszenie ciśnienia wody i w odpowiednim momencie zgłosić je do działu utrzymania ruchu, co może skrócić czas potrzebny na naprawę. Na stanowisku mycia formatek szklanych czystość ma duże znaczenie. Zanieczyszczenia przenoszone na szybach dostają się do obiegu zamkniętego mycia wstępного i zasadniczego, dlatego woda ta musi być wymieniana co 10 partii produktu. Zaproponowano wprowadzenie standardu 5S, który w rezultacie może przyczynić się do wydłużenia okresu czasu pracy pomiędzy wymianami wody. W oparciu o doświadczenia firmy we wdrażaniu zasad 5S (w innych obszarach produkcji), na potrzeby symulacji przyjęto, że wdrożenie nowych standardów może przyczynić się do zmniejszenia częstotliwość wymiany wody (co 15 partii). Wyniki takiej symulacji (rys. 3) wskazują, iż przyczyni się to do wyprodukowania dodatkowej partii produktu (30 szt.). Jest to wynik bardzo zadowalający, ponieważ - możliwy do uzyskania bez dodatkowych nakładów, dzięki wprowadzeniu dobrej organizacji i porządku w miejscu pracy.

Porównując wyniki obu symulacji, widać znaczną poprawę nie tylko w funkcjonowaniu myjki. Zostały również odblokowane maszyny znajdujące się w procesie przed myjką. Etap hartowania, który następuje po myciu, też wykazał wyższy udział czasu pracy w stosunku do okresu bezczynności (skrócił się czas oczekiwania na partię produktu). Niepokojący pozostał czas awarii myjki (udział procentowy).

Szczegółowa analiza procesu wskazała, iż awarie te spowodowane są w większości zabrudzeniem i zakamienieniem dysz myjących.



Rys. 3. Wyniki symulacji III [13]

Wdrożenie zasad 5S powinno pozwolić na zmniejszenie części zabrudzeń w zbiornikach mycia wstępного i zasadniczego. Kolejną możliwością poprawy jakości wody w procesie jest zastosowanie urządzeń do zmiękczenia wody dla przemysłu. Dodatkowo, należy pamiętać o okresowej wymianie w pompach w zbiornikach wody. Systematyczna kontrola przez operatorów, regularne przeglądy i konserwacje wykonywane przez Dział Utrzymania Ruchu powinny skutkować mniejszą liczbą awarii. Przyjęto, iż powyższe działania tj. regularne kontrole oraz instalacja urządzenia do zmiękczenia wody może zwiększyć dostępność maszyny z 85% na 90%. Jednocześnie założono, iż awarie, które niezależnie od powyższego mogą wystąpić, będą awariami bardziej skomplikowanymi i dlatego przyjęto możliwy dłuższy czas ich trwania. Po wprowadzeniu zmian w parametrach awaryjności myjki sprawdzono wynik symulacji (IV).

Tab. 5. Obciążenie w wyniku zmian w parku maszynowym (sym. IV)

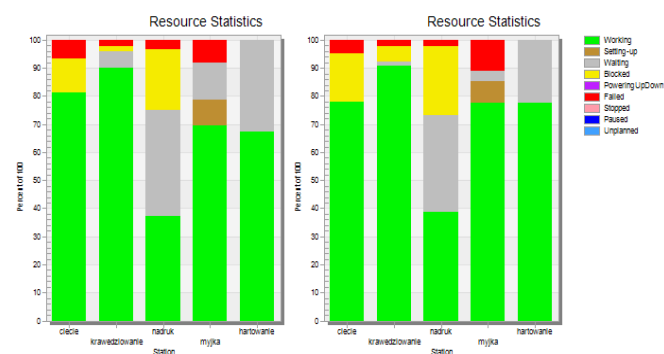
	Wykonywanie pracy [%]	Oczekiwanie [%]	Zablokowanie przez następne procesy [%]	Przezbieranie [%]	Awarie [%]
Maszyna do rozkroju	81,27	0,00	12,18	0,00	6,50
Szlifierka krzyżowa	89,95	5,85	2,10	0,00	2,10
Laser do nadruku	37,17	37,93	21,65	0,00	3,20
Myjka	69,47	13,00	0,00	9,38	8,10
Piec do hartowania	67,38	32,62	0,00	0,00	0,00

W przypadku podniesienia dostępności myjki i zwiększenie czasu MTTR, czyli średniego czasu naprawy, liczba produkowanych partii produktu zwiększyła się z 30 do 32 sztuk w czasie ośmiu godzin. Dla pełnej oceny dokonano analizy procentowych wartości pracy maszyn na poszczególnych stanowiskach (tab. 5).

3.3. Zmiana czasu symulacji

W kolejnych etapach badań wydłużono czas symulacji do 160 godzin. Przeanalizowano również dodatkowy wskaźnik jakim jest liczba partii produktu wyprodukowana na godzinę. W pierwszej kolejności zbadano, czy dłuższy czas symulacji wpłynie na wyniki produkcji. Na rys. 4 przedstawiono dwa wykresy – jeden dla symulacji trwającej jeden dzień, drugi dla symulacji trwającej miesiąc. Pozwolił on ocenić, na ile czas symulacji wpływa na wykorzystanie

poszczególnych maszyn. Z analizy wykresów (rys. 4) widać, że zmniejszony został czas oczekiwania, a zwiększył się udział pracy w całkowitym dostępnym czasie każdej z maszyn. Wpływa na to fakt, iż w codziennej praktyce firmy, nie oczekuje się na dostawę pierwszej partii na każdą maszynę, lecz wykorzystywane są niedokończony elementy z dnia poprzedniego.



Rys. 4. Porównanie wyników dla różnych czasów symulacji [13]

Do celów kolejnego porównania, w tab. 6 zawarto dane dotyczące wykorzystania maszyn przy symulacji trwającej trzy miesiące pracy. Analizując dane w tabeli można zauważyć, że zmniejszył się czas oczekiwania na produkt. Wyniki symulacji wskazują również na możliwość awarii pieca do hartowania. Z powodu wystąpienia tej awarii zmniejsza się procentowy udział wykonywanej pracy, jednak należy przyjąć, że jest to wynik najbardziej zbliżony do rzeczywistości. Dalej, wyniki symulacji wskazują, iż myjka dostępna była 74,89 % czasu. Na jej dostępność wpływają głównie dwa czynniki: przezbieranie i awarie. Czas przeznaczony na przezbieranie jest niezbędny do prawidłowej produkcji i dlatego też nie został potraktowany jako strata. Z kolei działania zmierzające do zmniejszenia czasu awarii myjki zostały już uwzględnione w poprzednich symulacjach.

Tab. 6. Obciążenie w wyniku zmian w parku maszynowym [13]

	Praca [%]	Oczekiwanie [%]	Zablokowanie przez następne procesy [%]	Przezbieranie [%]	Awarie [%]
Maszyna do rozkroju	75,07	0,00	19,79	0,00	5,14
Szlifierka krzyżowa	87,49	2,29	6,82	0,00	3,39
Laser do nadruku	37,48	34,71	25,70	0,00	2,11
Myjka	74,89	4,99	3,20	9,38	9,34
Piec do hartowania	67,40	28,55	0,00	0,00	4,05

Maszyną, która posiada bardzo niski udział pracy w stosunku do czasu oczekiwania czy awarii jest laser do nadruku. Obciążenie tego stanowiska jest bardzo niskie (maszyna pracowała zaledwie 37,48 % czasu). Wyniki wskazują, że laser nie pracuje przez większą część czasu z powodu zablokowania przez poprzedni lub następny proces. Wynika to z faktu, iż czas obróbki produktu przez laser (czyli nadruk) trwa znacznie krócej niż pozostałe procesy. W takim przypadku nie ma potrzeby optymalizować pracy tej maszyny, chyba, że przyczyni się to do zmniejszenia udziału liczby awarii. W całym zakładzie wdrażane są standardy 5S oraz Total Productive Maintenance, co w przyszłości powinno dla tego procesu przynieść dodatkowe korzyści.

Kolejną maszyną o niskim udziale procentowym czasu pracy był piec do hartowania. Piec nie wymaga przebrojeń, nie jest także zablokowany przez następne maszyny. Procentowy udział awarii był także stosunkowo niski (4,05 %). Przy tak zdefiniowanych parametrach procesu, piec nie mógł pracować więcej ze względu na oczekiwanie na produkt tzn. był zablokowany przez poprzedzające procesy. Stąd, wobec tych procesów podjęto działania optymalizacyjne. Ostatnią maszyną, poddaną analizie była zatem maszyna do rozkroju

3.4. Optymalizacja operacji rozkroju szkła

Proces rozkroju szkła ma ściśle określony czas (prędkość cięcia jest ustalona przez producenta maszyny). Wykorzystanie surowca jest optymalizowane przez program obsługujący stół do rozkroju. Czas, który został założony w symulacji nie jest jedynie czasem bezpośredniego rozkroju, lecz obejmuje także dodatkowe operacje: dostarczenia szkła na stół oraz łamanie szkła na formatki. Analiza rzeczywistego procesu wskazuje, iż nie jest możliwe skrócenie czasu przekazywania tafli szkła na stół. Możliwe jest natomiast zmniejszenie miejsca potrzebnego na magazyn szkła, co w przyszłości może być niezbędne do umieszczenia dodatkowych maszyn, bądź powiększenia produkcji. Zwiększenie możliwości magazynowych zakładu pozwoliłoby na zamówienie pełnych transportów tafli jumbo, co znacząco wpłynęłoby na zmniejszenie udziału kosztów transportu w całym koszcie produkcji. W analizowanym przypadku, ta zmiana przyniesie korzyści pośrednio, zwiększając powierzchnię produkcyjną, na której będzie można przykładowo zamontować kolejną maszynę do krawędziowania, która nadal jest elementem blokującym proces.

Na tym etapie analizy zaproponowano nową ładowarkę kompaktową w połączeniu z ramami oraz magazyn na tafle resztkowe. Smukła konstrukcja podnoszonych ram ssawkowych pozwala na zmniejszenie wymaganej szczeliny pomiędzy taflami. Dodatkowo taka ładowarka umożliwia obsługiwanie kilku linii do cięcia szkła, co w przyszłości może być potrzebne dla rozwijającego się zakładu. Z kolei magazyn nie zabiera dodatkowej przestrzeni, gdyż jest to magazyn poziomy pozwalający na bardziej elastyczną produkcję. Opisanie zmiany nie wpłynęło znacznie na powiększenie produkcji, natomiast pozwolą na późniejszą rozbudowę przedsiębiorstwa, lepsze dopasowanie go do potrzeb rynku czy powiększenie asortymentu. Na potrzeby symulacji przyjęto, że zmiana sposobu przechowywania tafli oraz tafli resztkowych zmniejszy czas rozkroju tafli średnio z 10 do 9 minut i taką możliwość przeanalizowano. Symulacje powtórzono dwukrotnie, dla 8 godzin oraz dla pracy wykonywanej przez trzy miesiące. W przypadku symulacji ośmiogodzinnej po zmianie czasu rozkroju wydajność nie uległa zmianie (4 partii na godzinę). Z kolei symulacja produkcji w ciągu kwartału wskazuje wynik 2160 sztuk, co daje średnio 4,5 partii na godzinę. Jest to 0,1 partii w ciągu godziny więcej, czyli 3,5 formatki szklanych więcej. To nie jest istotna zmiana, niemniej warto ją rozważyć, tym bardziej, że system zarządzania produkcją w badanej firmie bazuje na ciągłym usprawnianiu procesów. Należy w tym miejscu przytoczyć wdrażaną filozofię Kaizen, która opiera się na ciągłym doskonaleniu procesu i poprawianiu stanowisk pracy. Stąd nawet niewielkie zmiany nie powinny być ignorowane, ponieważ małymi krokami dążą do doskonałości. Wyniki przeprowadzonej symulacji przedstawiono w tab. 7.

Analizując wyniki symulacji można obliczyć o ile procent wzrósł udział pracy każdej z maszyn. Maszyna do rozkroju pracowała o 7,37% czasu dostępnego krócej. Spowodowane to jest skróceniem czasu obróbki formatki szklanych. Dzięki skróceniu tego czasu maszyna jest w stanie rozkroić więcej tafli na formatki w tym samym czasie.

Tab. 7. Obciążenie w wyniku symulacji V [13]

	Praca [%]	Oczekiwanie [%]	Zablokowanie przez następne procesy [%]	Przeobrażanie [%]	Awarie [%]
Maszyna do rozkroju	67,70	0,00	27,16	0,00	5,14
Szlifierka krzyżowa	87,67	2,17	6,77	0,00	3,39
Laser do nadruku	37,55	33,71	26,63	0,00	2,11
Myjka	75,02	4,88	3,21	7,55	9,34
Piec do hartowania	67,50	28,45	0,00	0,00	4,05

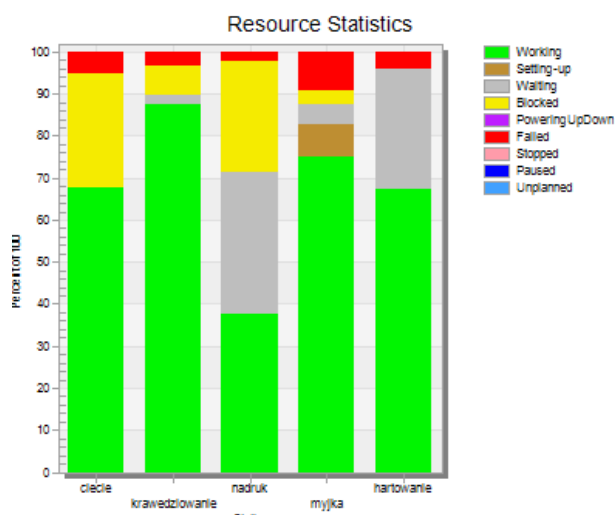
Wszystkie pozostałe maszyny pracują dłużej w porównaniu do wyników poprzedniej symulacji. Mimo tego, iż wskaźniki te nie zmieniły się znacząco, to dokupienie magazynu na tafle resztkowe pozwoli poszerzyć ofertę producenta o różne rozmiary formatki szklanych i produkowanie ich w ilości takiej jaką potrzebuje rynek i bez zapasów. Brak zapasów i elastyczna produkcja zgodnie z potrzebami rynku to metoda zarządzania produkcją obecnie wdrażana w firmie (system ssący). Wprowadzenie takiego systemu pozwoli także właściwie planować produkcję i wyeliminować niektóre problemy jakościowe. Zakup magazynu na tafle resztkowe uczyni produkcję bardziej elastyczną, ponieważ rozkrój jest jedyną operacją, która wymaga przebrojenia w zależności od wielkości zamówionych formatki. System sam wybiera odpowiedni układ wycinanych formatki z tafli jumbo, ponieważ z jednej tafli można jednocześnie wycinać formatki różnego rodzaju. Jedyną przeszkodą do rozkroju tafli na różne rozmiary i w różnych ilościach był odpad szkła i ta przeszkoda została wyeliminowana dzięki zaproponowanym zmianom.

3.5. Optymalizacja operacji krawędziowania i mycia

Dane z poprzedniej symulacji wskazują, iż maszyny pracują przez większość dostępnego czasu. Wyjątkiem jest proces nadruku. Powodem tego stanu jest krótszy czas operacji na tej maszynie, co sprawia, że jest ona częściej zablokowana przez następny proces albo czeka na dostawę surowca. Analizując wykres na rys. 5 można odczytać, że stacjami blokującymi zwiększenie produkcji jest krawędziowanie i mycie. Skrócenie czasu krawędziowania, pozwoli na lepsze wykorzystanie maszyny do rozkroju, nadruku oraz wszystkich kolejnych. Aby potwierdzić tą tezę zdecydowano się dołożyć kolejną szlifierkę pasowo-krzyżową i sprawdzić wyniki symulacji. Możliwość jej uwzględnienia powstała dzięki optymalizacji procesu rozkroju szkła i zmniejszeniu części magazynowej.

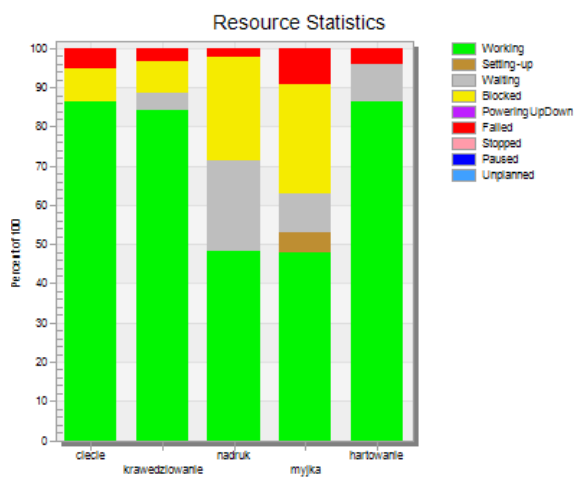
Wyniki przeprowadzonej symulacji wskazały na wzrost liczby partii na godzinę, przy eliminacji czasu oczekiwania na partię produktu na początku symulacji. W trakcie trzymiesięcznej symulacji wyprodukowano średnio 37,7 partii dziennie. W porównaniu do symulacji jednodniowej to różnica 3,7 partii dziennie. Zwiększył się również udział pracy w działaniu poszczególnych maszyn.

Drugi problem rozważany na tym etapie badań dotyczył operacji mycia. Powierzchnia produkcyjna przedsiębiorstwa jest niewystarczająca do zamontowania kolejnej maszyny. Dodatkowo, zakup myjki jest nieopłacalny pod względem ekonomicznym. Niemniej sytuacja taka została rozważona na etapie prowadzonych badań.



Rys. 5. Wyniki symulacji VI [13]

Wynikiem symulacji z uwzględnieniem zakupu kolejnej myjki jest wzrost produkcji do 2764 sztuk w ciągu trzech miesięcy, co daje prawie 8,5 partii dziennie więcej. Wynik ten charakteryzuje duży wzrost, który wpłynąłby pozytywnie na całą produkcję, dlatego taka zmiana powinna być uwzględniona w przypadku możliwości powiększenia powierzchni produkcyjnych, bądź wygospodarowania dodatkowego miejsca na tę maszynę.



Rys. 6. Wyniki symulacji VII [13]

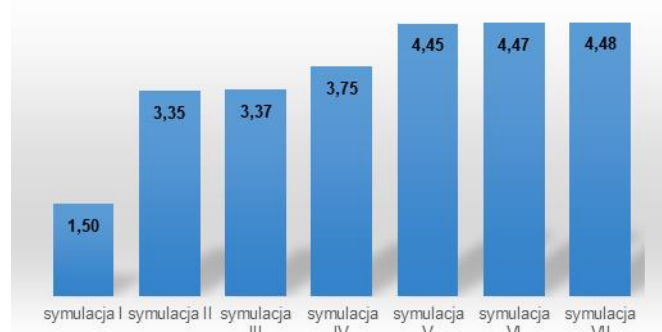
Przeanalizowano również obciążenie maszyn w procesie (rys. 6). Z analizy wykresu widać, że znacznie spadło wykorzystanie myjek. Produkcja uwzględniła niemal maksymalne wykorzystanie maszyny do rozkroju. Jest to już ograniczenie w rozbudowie tego procesu produkcji, ze względu na dużą powierzchnię zajmowaną przez maszynę oraz jej ogromny koszt. Podobny problem dotyczy pieca do hartowania. Jedynie znaczny wzrost zamówień pozwalający na uruchomienie równoległe całej nowej linii do hartowania szkła byłby argumentem za zakupieniem dodatkowych maszyn. Z tych powodów wynik, uzyskany przez powyższe zmiany należy uznać za optymalny w obrębie analizowanego systemu wytwórczego.

Przeprowadzone symulacje nie uwzględniają analizy kosztów zakupu maszyn, które mogą wpłynąć na decyzje dotyczące realizacji danego procesu. Niemniej pozwalają na bezpośrednią identyfikację obszarów redukcji kosztów i zwiększenia wydajności.

Podsumowanie

Przeprowadzone symulacje pozwoliły na bezpośrednią identyfikację obszarów zwiększenia wydajności w badanym procesie a

zastosowane oprogramowanie na – szacowanie ich wielkości (rys. 7).



Rys. 7. Szacowana wydajność (liczba partii na godzinę) w ramach poszczególnych symulacji

Wyniki prowadzonych symulacji zostały w pełni wykorzystane i zaimplementowane w realny system produkcyjny. W analizowanym przedsiębiorstwie zaproponowano również inne zmiany wynikające z wdrażanej strategii Lean Manufacturing, które nie zostały ujęte w ramach symulacji.

Powyższe może odegrać ważną rolę w analizie ryzyka, gdyż wskazuje scenariusze oparte na propozycjach podejmowanych działań.

Zastosowane oprogramowanie komputerowe pozwoliło tworzyć komputerowe modele systemów produkcyjnych, badać ich zachowanie i optymalizować procesy w nich zachodzące. W wyniku prowadzonych symulacji otrzymano zestaw scenariuszy optymalizacyjnych, dzięki którym można było podjąć dalsze decyzje, np. dot. liczby maszyn, wielkość buforów, tak aby otrzymać założony efekt (zwiększenie wydajności produkcji). Na badanym modelu można przeprowadzać kolejne symulacje zmieniając dane wejściowe czy ustawienia maszyn oraz go udoskonalać.

Obecnie symulacje stosuje się do modelowania produktów, materiałów i całych procesów produkcyjnych, ale w przyszłości wykorzystanie symulacji w fabrykach znacznie się zwiększy. Symulacje pozwolą inżynierom testować i optymalizować ustawienia urządzeń zanim zmiany zostaną wprowadzone w środowisku rzeczywistym, np. podczas dostosowywania linii produkcyjnej do zmiany produktu. Dzięki temu czas konfiguracji urządzeń może zmniejszyć, a jakość produktu ulec poprawie.

Warto nadmienić, że budowa poprawnie działającego modelu systemu wytwórczego jest pracochłonna i wymaga zarówno dobrej znajomości modelowanego procesu, jak i programu symulacyjnego [7]. Ponadto, na jakość modelu wpływa też poziom szczegółowości odwzorowania. Zastosowane oprogramowanie stanowi odpowiednie narzędzie do modelowania i symulacji zdarzeń. Pozwala na tworzenie cyfrowych modeli systemów produkcyjnych, co z kolei umożliwia sprawdzanie charakterystyk systemów i optymalizację ich wydajności.

Dążenie do szczupłego wytwarzania z wykorzystaniem koncepcji przemysłu 4.0 jest dziś koniecznością, aby firmy przetrwały i rozwijały się w otaczającym świecie biznesowym. Wykorzystanie w procesach decyzyjnych wirtualnych symulacji i przetwarzania danych procesowych to kluczowy element czwartej rewolucji przemysłowej.

Bibliografia:

1. Bangsow S., Manufacturing simulation with Plant Simulation and SimTalk, SpringerVerlag Berlin Heidelberg 2010

2. Berlińska J., Modelowanie procesów logistycznych w aspekcie utrzymania ruchu, *Logistyka* 2012, nr 5,
3. Cisowski T., Wojciechowski Ł. Wydajność łańcuchów dostaw węgla, *Projektowanie i sterowanie procesami* pod red. Janczarek M.M., Lipski J., Politechnika Lubelska, Lublin 2013
4. Cizak O., Komputerowo wspomagane modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją* Nr 6. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, s. 39-45, 2007
5. Danilczuk W., Cechowicz R., Gola A., Analiza konfiguracji linii produkcyjnych na podstawie modeli symulacyjnych, *Informacyjne systemy zarządzania*, Koszalin, 2014.
6. Gołda G., Gwiazda A., Kampa A., Monica Z., Zastosowanie systemów komputerowego wspomaganie w planowaniu działań logistycznych. *Aspekty Logistyczne w Biznesie* pod red. Kowalska K, Sobczak P., WSB Dąbrowa Górnicza, 2015.
7. Janisz K., Mikulec A., Górka K. Symulacja procesu produkcyjnego w aspekcie jego logistyki, wydajności i niezawodności, *Autobusy* 6/2017
8. Karkula, M., Weryfikacja i validacja dynamicznych modeli symulacyjnych procesów logistycznych, *Logistyka* 2012, nr 2, s.717-726.
9. Kłos, S., Patalas-Maliszewska J., Symulacja przebiegu procesów produkcyjnych w systemach przepływowych w oparciu o oprogramowanie Tecnomatix Plant Simulation w: R. Knosala (red.), *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji* Opole, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2016.
10. Kostrzewski M., Porównanie metod projektowania magazynu – projektowanie wg procedury analitycznej oraz przy użyciu narzędzia symulacyjnego. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej z.70 Transport* 2009
11. Małecki K., Szarafińska M., Modelowanie procesów logistycznych w przedsiębiorstwie wirtualnym, *Polskie Stowarzyszenie Zarządzania Wiedzą, Seria: Studia i Materiały* nr 17, 2008
12. Stadnicka D., Mach A., Symulacja pracy linii produkcyjnej na przykładzie praktycznym, *Zarządzanie Przedsiębiorstwem* Nr 2, 2011
13. Szczurek I. Optymalizacja wybranego procesu produkcyjnego na bazie różnych scenariuszy, *Praca dyplomowa na kierunku Zarządzanie i inżynieria produkcji, PWSZ w Nowym Sączu*, 2018

The simulation of production performance – a case study

The article presents the possibilities of using a computer simulation to analyze a selected production process. The research was carried out based on data from the plant producing shaft packages from ready glass molds. The simulation takes into account the availability of machines and the average repair time for individual machines. An exemplary model was presented and various organizational and logistic solutions were analyzed.

The conducted simulations allowed for direct identification of areas of increased efficiency. The solution to the highest process efficiency was indicated.

Keywords: simulation, production process, efficiency

Autorzy:

dr inż. **Karina Janisz** – Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu, Instytut Techniczny, ul. Staszica 1, 33-300 Nowy Sącz, e –mail: kjanisz@pwsz-ns.edu.pl.

mgr inż. **Izabela Szczurek** – Fakro Sp. z o. o. ul. Węgierska 144a, 33-300 Nowy Sącz