

# OPTIMALIZACJA PROCESÓW PRODUKCYJNYCH ZA POMOCĄ NARZĘDZI CYFROWYCH

Sebastian JUCHA, Krzysztof NOWACKI

**Streszczenie:** W otaczającym nas świecie dochodzi do bardzo dynamicznych zmian. Związane są one zarówno z szybko ewoluującymi wymaganiami klientów, jak i rozwojem szeroko rozumianej nauki, co determinuje konieczność zmian specyfikacji oferowanego produktu, a co za tym idzie zmian technologii produkcyjnych. Ponadto ewoluuje również sam proces produkcyjny. Rozwój bądź modyfikacje technologii, skutkujące np. modyfikacją parku maszynowego wymagają modyfikacji bądź optymalizacji rozmieszczenia przestrzennego ciągu technologicznego w hali produkcyjnej. Wszelkie zmiany powinny być szczegółowo przeanalizowane pod kątem przyjętych kryteriów. W pracy przedstawiono proces optymalizacji produkcji elementów z tworzyw sztucznych. Jako kryterium optymalizacji przyjęto koszt wytwarzania. Analizę przeprowadzono za pomocą jednego z komercyjnych programów symulacyjnych.

**Słowa kluczowe:** optymalizacja, cyfrowa fabryka, proces produkcyjny

## 1. Wprowadzenie

Procesy produkcyjne, ze względu na stosowanie zaawansowanych technologii i rozwiązań logistycznych, stanowią dziś zbiór współzależnych od siebie działań, wpływających na efektywność, która zgodnie z teorią zarządzania jest rezultatem podejmowanych działań opisanych relacją uzyskanych efektów. Pomiaru efektywności dokonuje się wykorzystując cząstkowe, syntetyczne wskaźniki produktywności wykorzystania zasobów, tj. pracy czy kapitału. Wykorzystanie zasobów winno być optymalne z punktu widzenia każdego ze stawionych przez zarządzającego procesem kryteriów, np. kosztu procesu czy czasu wykorzystania maszyn. Przy czym optymalnego wykorzystania zasobów z punktu widzenia technologii nie należy postrzegać jako wykorzystania maksymalnego [1-4].

Optymalizacja procesu może być prowadzona pod kątem spełnienia określonego kryterium, jednak z uwzględnieniem efektywności wszystkich jego składowych. Przykładowo analizę przepływu materiałów winno się prowadzić z uwzględnieniem zagadnień dot.:

- a) transportu – uwzględniając typ transportu używany w procesie produkcyjnym, prędkość z jaką porusza się między stacjami, stawkę kosztów, czas ładunku oraz rozładunku, kierunkowość oraz typ przepływu jako ciągły bądź dyskretny,
- b) operacji – określając rodzaj operacji wykonywanej w stacji roboczej oraz czas przetwarzania niezbędny do zakończenia jednego pełnego cyklu i czas konfiguracji wymagany do skonfigurowania wyposażenia przed uruchomieniem operacji,
- c) stacji roboczej (gniazda produkcyjnego) – określając stawkę kosztów konfiguracji oraz przetwarzania, procentowy czas dostępności oraz zużycie energii,

- d) systemu pracy – określając liczbę godzin na jedną zmianę oraz liczbę zmian danego dnia,
- e) realizowanego zadania – uwzględniając żadaną szybkość produkcji, a więc liczbę części produkowanych w jednostce czasu, liczbę części które mają być wyprodukowane w ramach zadania oraz rozmiar wsadu czyli liczbę części która może być przemieszczana w jednym transporcie [1, 2, 5].

Optimalizacja procesu produkcyjnego, w dzisiejszych czasach, winna odbywać się z wykorzystaniem cyfrowych programów symulacyjnych, które będąc zaawansowanymi narzędziami projektowym pozwalają wielokryterialnie zoptymalizować procesy produkcyjne również w ujęciu przestrzennym 3D [6, 7].

## **2. Analiza optymalizacji produkcji w zakładzie wytwórczym.**

W pracy przedstawiono wyniki optymalizacji rozmieszczenia maszyn w hali produkcyjnej oraz funkcjonowania wybranych maszyn, opracowane dla zakładu zajmującego się wytwarzaniem elementów z tworzyw sztucznych z wykorzystaniem wtryskarek. Analiza wykonana została w celu poprawy wydajności pracy firmy i ograniczenia kosztów w obszarach zidentyfikowanych jako te, w których zmiany mogą przynieść najbardziej wymierne efekty. Ze względu na generowanie zbyt dużych, zdaniem pracodawcy kosztów procesu, przyjęto je jako podstawowe kryterium optymalizacji. W związku z powyższym, podejmowane działania dotyczyły ograniczenia kosztów transportu wewnątrzzakładowego oraz kosztów produkcji i zużycia energii elektrycznej poprzez usprawnienie funkcjonowania najbardziej obciążonej stacji roboczej.

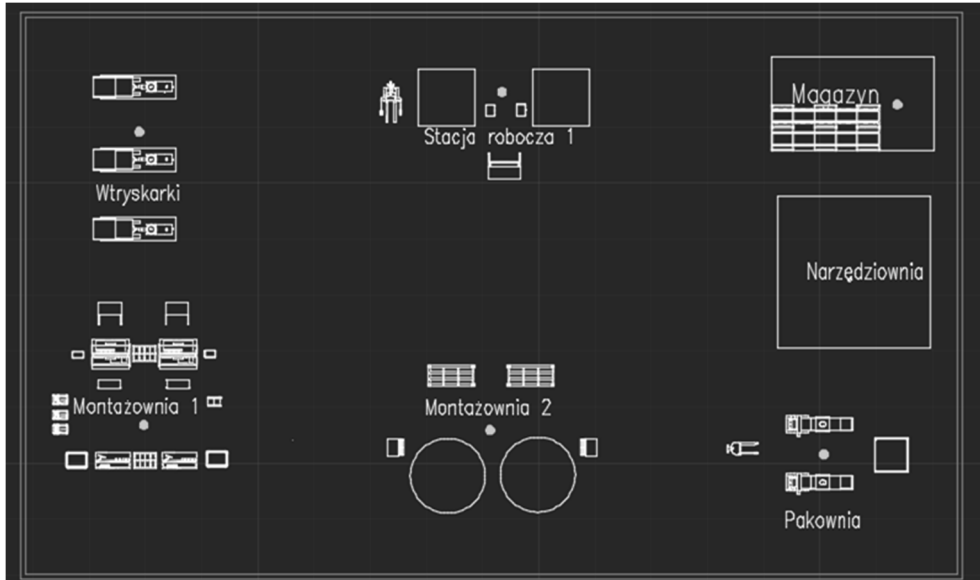
### **2.1. Optymalizacja rozmieszczenia stacji roboczych**

Proces produkcyjny elementów wytwarzanych z tworzyw sztucznych realizowany jest na linii produkcyjnej składającej się z: magazynu, stacji wtryskarek, dwóch montażowni, stacji roboczej oraz pakowni. W pierwszej kolejności wykonany został, w programie AutoCAD Architecture, schematyczny plan zakładu produkcyjnego (Rysunek 1). Ze względu na złożoność linii produkcyjnej niektóre obiekty stacji roboczych zastąpione zostały obiektami zastępczymi, jak to ma miejsce w przypadku „stacji roboczej” i „montażowni 2”. Na rysunku 2 przedstawiono wizualizację analizowanej linii produkcyjnej po wykonaniu synchronizacji rysunku z programem Inventor.

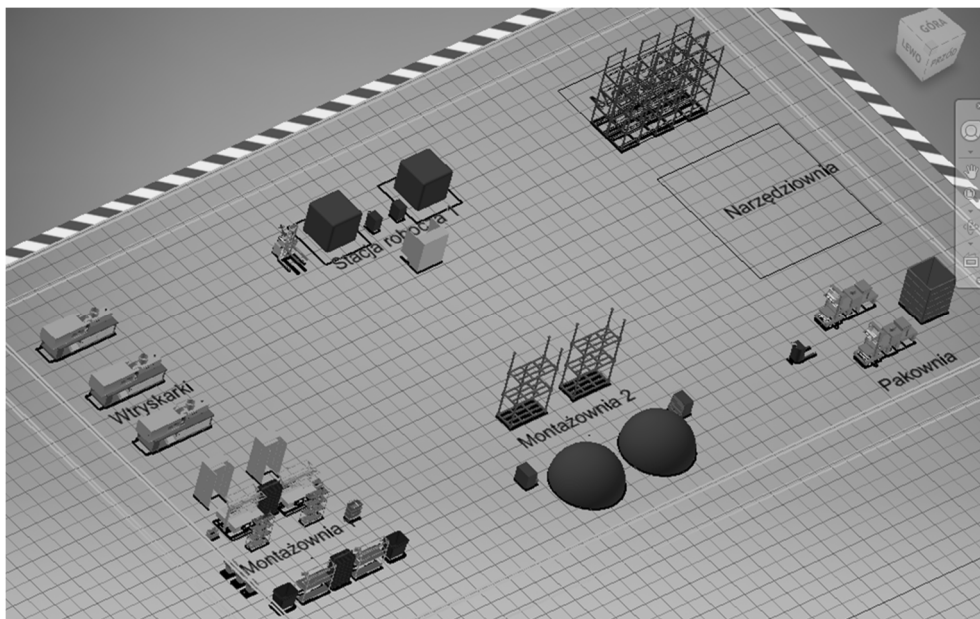
Wszystkim stacjom roboczym występującym w zakładzie przypisane zostały parametry, które zostały zestawione w tabeli 1. Parametry wykorzystanych wewnątrzzakładowo środków transportu zestawione zostały natomiast w tabeli 2.

W kolejnym kroku zdefiniowano trasę jaką pokonuje produkt w cyklu produkcyjnym. Rysunek 3 przedstawia schemat procesu produkcyjnego na zaprojektowanej linii produkcyjnej. Schemat został utworzony przy pomocy internetowego narzędzia Process Analysis 360.

Granulat z magazynu, przy zastosowaniu pneumatycznego układu rozprowadzającego, trafia na stację wtryskarek skąd wypraska transportowana jest do stacji roboczej gdzie wykonywana jest operacja rozdzielania jednego detalu na dwa różne, które to trafiają do montażowni 1 i montażowni 2. Po tych operacjach elementy podlegają ponownie połączeniu w pakowni i umieszczane są w skrzyni jako produkt gotowy. Jedna partia produkcyjna składa się ze 100 produktów. Wielkość wsadu, a więc liczba elementów przemieszczanych między stacjami roboczymi w jednej partii, wynosi 20.



Rys. 1. Schemat linii produkcyjnej



Rys. 2. Wizualizacja 3D linii produkcyjnej

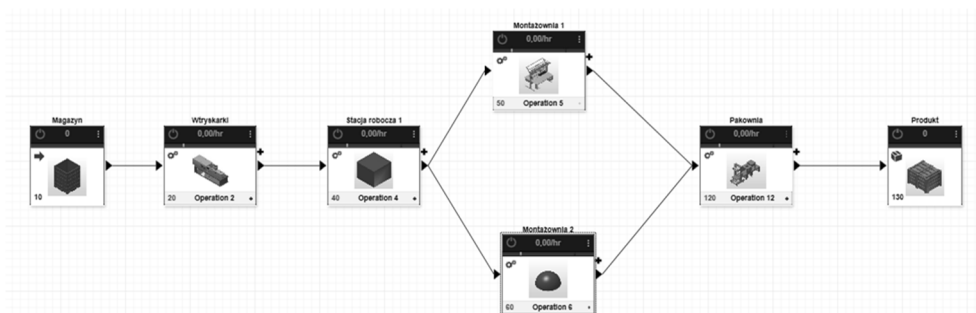
Tabela 1 Parametry stacji produkcyjnych

	<b>Magazyn</b>	<b>Wtryskarki</b>	<b>Stacja robocza 1</b>	<b>Montażownia 1</b>	<b>Montażownia 2</b>	<b>Pakownia</b>
Stawka kosztów konfigurowania, jbw	-	25	10	7	10	10
Stawka kosztów przetwarzania, jbw	-	20	10	10	10	10
% czasu dostępności	100	90	90	80	80	65
Zużycie energii, kW	5	100	20	8	5	15
Środek transportu do następnej stacji	Pneumatyczny centralny układ rozprowadzający	człowiek	przełożnik widłowy	człowiek	człowiek	-
Czas przetwarzania, min	-	7	3	5	5	2
Czas konfiguracji, min	-	5	1,5	2	1,5	0.5

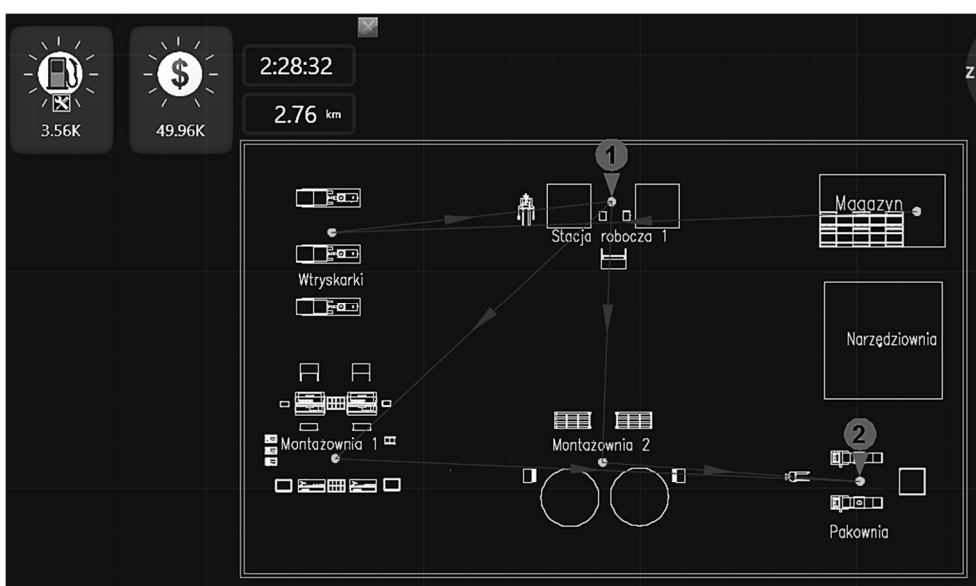
Tabela 2 Parametry środków transportu

	<b>Człowiek</b>	<b>Przełożnik widłowy</b>	<b>Pneumatyczny centralny układ rozprowadzający</b>
Prędkość transportu, m/min	30	90	250
Stawka kosztów, jedn./min	10	25	10
Czas ładunku, min	1	0,5	0,5
Czas rozładunku, min	1	0,5	0,5

Po wprowadzeniu wszystkich parametrów charakteryzujących linię produkcyjną oraz zdefiniowaniu trasy, jaką musi pokonać produkt (rysunek 4) za pomocą funkcji programu określono koszty transportu wewnątrzzakładowego, całkowity koszt produkcji, czas zużywany w przypadku wybranych ścieżek transportu oraz całkowitą odległość wybranych tras.

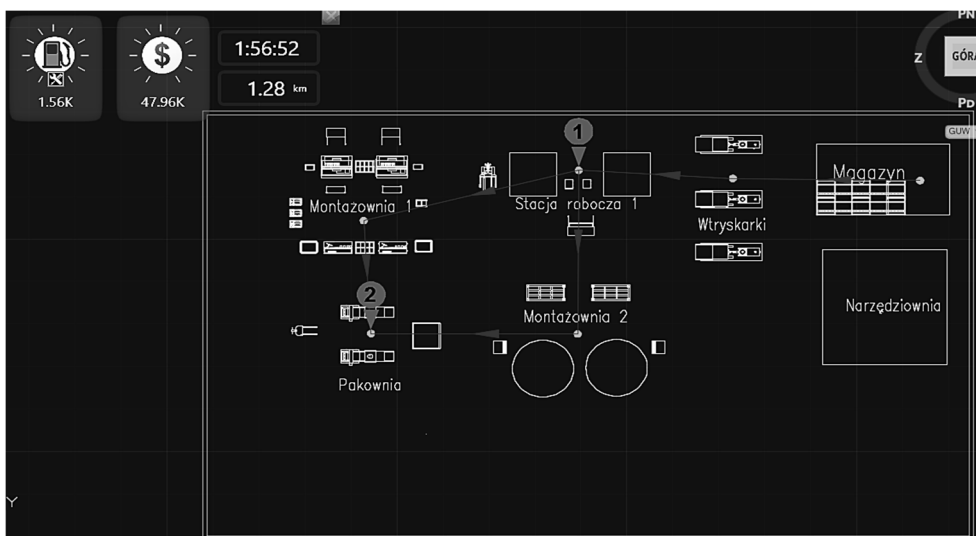


Rys. 3. Schemat przebiegu procesu na linii produkcyjnej



Rys. 4. Schemat linii produkcyjnej z wyznaczoną ścieżką produkcji oraz wartościami wynikającymi z symulacji „przeływ materiału transport”

Poprzez zmianę położenia stacji roboczych na terenie zakładu produkcyjnego można doprowadzić do zminimalizowania kosztów transportu jak i do skrócenia jego czasu. Rysunek 5 przedstawia schemat linii produkcyjnej po zoptymalizowaniu położenia stacji roboczych. Analizując wyniki zawarte w tabeli 3 stwierdzono, iż zmiana położenia stacji roboczych wpłynęła na ograniczenie transportu wewnątrzzakładowego co przyczyniło się do obniżenia kosztów transportu, które to zostały zredukowane z 3,56K jednostek do 1,56K jednostek i przeszło dwukrotnego skrócenia odległości potrzebnej do pokonania w ramach transportu wewnątrzzakładowego (z 2,76km do 1,28km). Skróceniu uległ również czas niezbędny do przetransportowania materiału w cyklu produkcyjnym z 2h 28min do 1h i 56 min. Zmiany te zostały uzyskane dzięki innemu rozlokowaniu stacji produkcyjnych, polegającemu w głównej mierze na zmniejszeniu odległości między maszynami na hali produkcyjnej oraz na takim ich rozmieszczeniu by ich położenie między sobą było zgodne z kierunkiem przepływu materiału w procesie produkcyjnym.



Rys. 5. Schemat linii produkcyjnej po optymalizowaniu położenia stacji roboczych

Tabela 3 zawiera zestawione wartości dotyczące transportu, przed zmianami oraz po relokacji rozmieszczenia stacji roboczych.

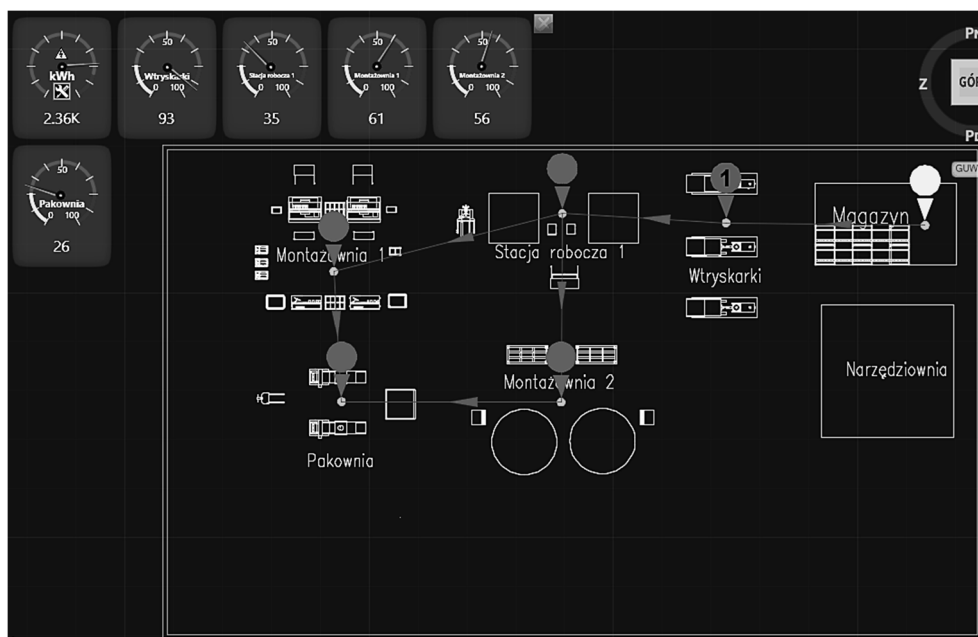
Tabela 3 Efekty optymalizacji transportu wewnątrzzakładowego.

	<b>Koszty transportu, jbw</b>	<b>Koszty produkcji, jbw</b>	<b>Czas, h:min:sek</b>	<b>Dystans, km</b>
<b>Przed optymalizacją</b>	3,56K	49,96K	2:28:32	2,76
<b>Po optymalizacji</b>	1,56K	47,96K	1:56:52	1,28

Wykorzystując funkcje oprogramowania (rysunek 6), dokonano pomiaru zużycia energii przez stacje robocze, niezbędnej dla przebiegu całego cyklu produkcyjnego uwzględnionego w analizie, a także przeanalizowano wskaźniki wykorzystania maszyn w postaci wartości procentowej wykorzystania. Wartości te są szacowane na podstawie procentowego czasu dostępności wykorzystywanych stacji i zestawione są w tabeli 4. Najwyższy wskaźnik wykorzystania stwierdzono na stacji wtryskarek, która to w kolejnym etapie podlegała optymalizacji w kierunku jego obniżenia.

## 2.2. Opis i optymalizacja stanowiska wtryskarek

Kolejnym etapem analizy była optymalizacja stanowiska wtryskarek, które stanowi wąskie gardło całego procesu. Związane jest to w głównej mierze z długimi czasami przygotowania procesu jak również z długim cyklem samego procesu wytwarzania elementów z tworzyw sztucznych, który musi podlegać regularnej kontroli. Proces ten generuje również wysokie koszty na zakładzie, które związane są zarówno z przyrządowaniem jak i koniecznością obsługi ich przez wysoko wykwalifikowany personel.



Rys. 6. Schemat linii produkcyjnej oraz analiza wykorzystania stacji roboczych

Tabela 4 Zestawienie wykorzystania stacji roboczych

Stacja robocza	Wtryskarki	Stacja robocza 1	Montażownia 1	Montażownia 2	Pakownia
<b>Współczynnik wykorzystania, %</b>	93	35	61	56	26

W firmie dla właściwego przygotowania surowca (granulatu) do produkcji na wtrysku przygotowana została instrukcja postępowania. Zakłada ona następujące kroki:

- Zsypać używany do tej pory granulatu do pojemnika przeznaczonego do przechowywania danego tworzywa.
- Dokładnie wyczyścić lej, zaciąg i wszystkie elementy układu zasilającego wtryskarkę granulatem.
- Odnaleźć numer granulatu potrzebnego do produkcji – widniejący na karcie technologicznej.
- Sprawdzić w karcie technologicznej lub tabeli zestawienia surowców warunki przygotowania granulatu do produkcji – parametry suszenia, proporcje barwnika – jeśli są wymagane.
- Pobrać granulatu i ewentualne barwniki z magazynu.
- Jeśli materiał powinien być suszony podstawić go pod oznaczoną jego numerem suszarkę i ustalić zalecane dla danego surowca parametry temperatury i czasu.
- Jeśli materiał musi być mieszany z barwnikiem należy:
  - W przypadku maszyny wyposażonej w urządzenie dozujące zasypać barwnik do dozownika i ustawić odpowiednią proporcję.

- W przypadku mieszania ręcznego należy odważyć odpowiednie proporcje granulatu i barwnika, dobrze wymieszać i zasypać manualnie do leja zasypowego maszyny.
- h) Jeśli jest dopuszczone użycie regranulatu to maksymalna jego zawartość w materiale rodzimym nie może być wyższa niż 20%.
- i) Użycie regranulatu jest możliwe tylko i wyłącznie gdy stanowisko pracy jest wyposażone w automatyczny zawór dozujący regranulat.
- j) Po rozpoczęciu produkcji należy porównać kolor oraz wygląd wypraski z detalami z ostatniej serii produkcyjnej lub wzorcowymi.

Gotowy granulat przy pomocy centralnego pneumatycznego układu rozprowadzania transportowany jest z magazynu w którym był przygotowywany do stacji wtryskarek.

Dla zapewnienia wysokiej jakości produkcji i jej powtarzalności istotne jest prawidłowe ustawienie parametrów procesu, które to wiąże się z kalibracją wielu parametrów. Są to m. in. ustawienia odpowiednich ciśnień (sił) oraz szybkości, czujników temperatury, systemów pomiaru drogi w takich elementach jak układ napędowy ślimaka, elementy grzejne, układ wyrzutnikowy, siłowniki hydrauliczne służące do zamykania i otwierania form oraz do wprowadzania tłoka w ruch postępowy, układ zamknięcia formy, układ chłodzenia oraz układ grzejny formy.

W dziale jakości w zależności od etapu prowadzonego procesu dokonywane są pomiary:

- a) Konieczne przed zwolnieniem procesu.
- b) W trakcie trwania procesu.

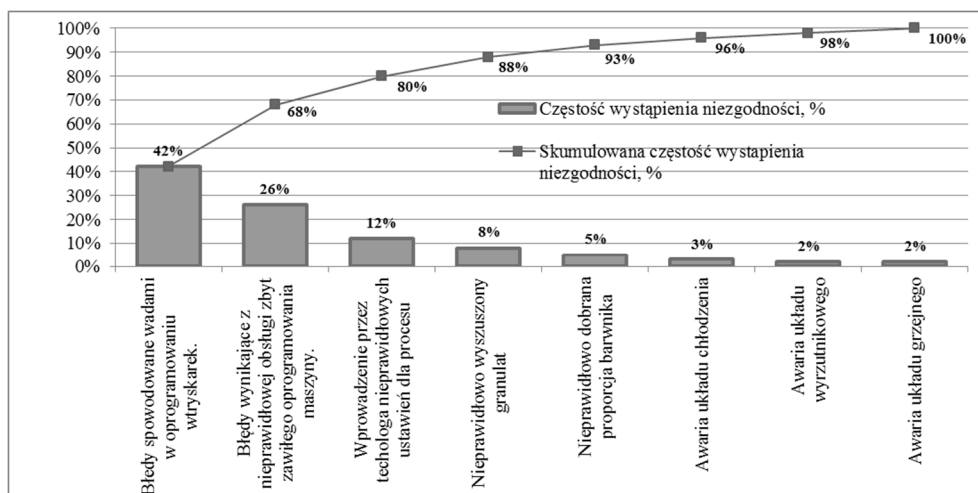
Dopuszczenie aktualnej produkcji wieńczone jest podpisem pakowacza na karcie produkcyjnej, natomiast w razie gdy linia nie jest dopuszczona podpis składa kierownik.

Duża złożoność prawidłowego ustawienia procesu i kontroli generuje dodatkowe koszty jak również bardzo wydłuża czas niezbędny do konfiguracji stanowiska w trakcie procesu produkcyjnego. Zgodnie z symulacjami, wykonanymi przy zastosowaniu programu Factory Design Suite, odnotować należy iż obciążenie urządzenia wynosi 93% co znacznie przekracza założony 80% próg wykorzystania. Dzięki przeprowadzonej analizie Pareto-Lorenza, zidentyfikowane zostały przyczyny wpływające na wystąpienie największej liczby niezgodności związanych bezpośrednio z wydłużeniem średniego czasu konfiguracji wtryskarki (rysunek 7). Zgodnie z wynikami analizy, największy wpływ na wydłużenie czasu konfiguracji maszyn, mają wady oprogramowania sterującego, jego duży stopień skomplikowania oraz błędy popełniane przez technologów.

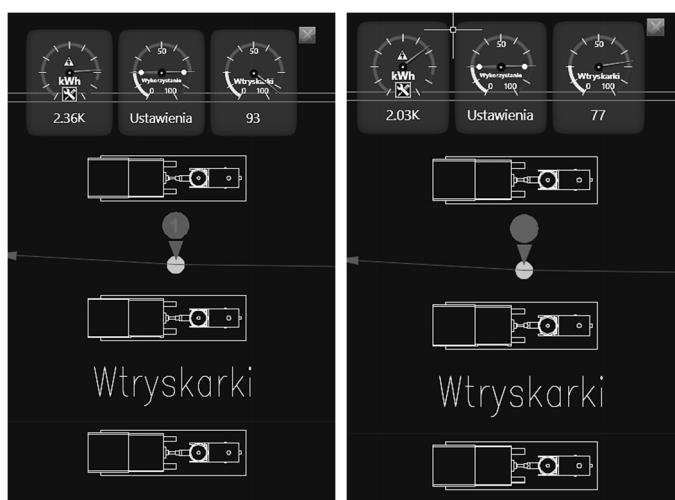
Dzięki zastosowaniu aktualizacji oprogramowania sterującego urządzeniem oraz przeprowadzeniu dodatkowych szkoleń pracowników odpowiedzialnych za obsługę wtryskarek doprowadzono do skrócenia czasu konfiguracji, wynoszącego uprzednio 5 min, do 3 min. Skutkowało to spadkiem współczynnika wykorzystania stacji roboczej poniżej wartości progowej, mianowicie do 77% (rysunek 8).

Skrócenie czasu konfiguracji, poza obniżeniem współczynnika wykorzystania stacji roboczej, wpłynęło również na obniżenie wykorzystania energii elektrycznej o 330kWh na cykl produkcyjny, oraz na obniżenie kosztów produkcji z 47,96K jednostek do 42,96K jednostek. Tabela 5 przedstawia zestawienie parametrów, które uległy zmianie na skutek podjęcia działań skracających czas konfiguracji wtryskarek.





Rys. 7. Diagram Pareto-Lorenza



Rys. 8. Wynik optymalizacji stanowiska wtryskarek

Tabela 5 Efekty optymalizacji stanowiska wtryskarek.

	Współczynnik wykorzystania, %	Koszty produkcji, jbw	Zużycie energii, kWh/cykl
<b>Przed optymalizacją</b>	93	47,96K	2360
<b>Po optymalizacji</b>	77	42,96K	2030

### 3. Podsumowanie

Programy cyfrowe stanowią narzędzie umożliwiające szerokie spektrum wykorzystania, pozwalając dzięki narzędziom analizy przepływu materiału na łatwiejsze projektowanie

linii produkcyjnych jak i całych zakładów. Dysponując szerokim zasobem biblioteki elementów infrastruktury przemysłowej, program wspomaga i przyspiesza proces projektowania, dając ponadto możliwość tworzenia i dodawania do biblioteki własnych zasobów. Korzyści płynące z wykorzystania oprogramowania optymalizującego związane są ze zwiększeniem produktywności pracy oraz wydajności projektowanych procesów, jak również z obniżeniem kosztów, dzięki możliwości analizowania i optymalizacji procesów przed rozpoczęciem inwestycji. Szybkie i łatwe konwertowanie projektów do wizualizacji trójwymiarowych pozwala zauważyć ewentualne przeszkody fizyczne trudne do przewidzenia w trakcie projektowania i usunąć je zanim zaczną generować dodatkowe koszty.

Podsumowując dokonaną analizę, można stwierdzić iż optymalizacja rozmieszczenia stanowisk roboczych wpłynęła na obniżenie kosztów transportu o 56%, dzięki skróceniu dystansu między stacjami roboczymi, co wpłynęło również na skrócenie czasu transportu. Wykorzystując narzędzia programu, zidentyfikowana została stacja o najwyższym wskaźniku wykorzystania na linii produkcyjnej, tj. stacja wtryskarek, przekraczającym założony próg. Identyfikacja przyczyn mających największy wpływ na wydłużenie czasu konfiguracji, przeprowadzona za pomocą analizy Pareto-Lorenza, pozwoliła na podjęcie działań korygujących. Skutkiem owych działań było obniżenie współczynnika wykorzystania stacji wtryskarek poniżej wartości nieakceptowalnej. Kolejnym skutkiem podjętych działań optymalizacyjnych było obniżenie kosztów produkcji o 10%, co było związane również z obniżeniem zużycia energii o 14%.

#### **Bibliografia:**

1. Więznowski A., Sosnowski M., Szlachetka P., Analiza i optymalizacja procesów produkcyjnych i usług, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu, Wrocław, 2007;
2. Janczarek M., Zarządzanie procesami produkcyjnymi w przedsiębiorstwie, Lubelskie Wydawnictwo Naukowe, Lublin, 2011;
3. Hamrol A., Zarządzanie jakością z przykładami, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2011;
4. Gawlik J., Plichta J., Świć A., Procesy produkcyjne. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 2013
5. <http://help.autodesk.com/> 08.01.2016r.
6. <http://www.procad.pl/> dostęp: 08.01.2016r.
7. <http://www.autodesk.com/> dostęp: 08.01.2016 r.
8. Johannaber F., Wtryskarki: poradnik użytkownika, Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych, Warszawa, 2000;
9. Pisz I., Sęk T., Zielecki W., Logistyka w przedsiębiorstwie, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 2013

Mgr inż. Sebastian JUCHA  
Dr hab. inż. Krzysztof NOWACKI, prof. nzw. w Pol. Śl.  
Katedra Inżynierii Produkcji  
Politechnika Śląska  
40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8  
e-mail: [sebastian.jucha@polsl.pl](mailto:sebastian.jucha@polsl.pl)  
[krzysztof.nowacki@polsl.pl](mailto:krzysztof.nowacki@polsl.pl)