

Optymalizacja procesu produkcji liniowej poprzez synchronizację cykli stanowisk roboczych z wykorzystaniem symulacji komputerowej

Data wpłynięcia do Redakcji: 06/2025
Data akceptacji przez Redakcję do publikacji: 07/2025

2025, volume 14, issue 1, pp. 73-87

Patryk Machnik, Iwona Łapuńska
Politechnika Opolska, Poland



Streszczenie: Celem artykułu jest analiza efektywności procesów produkcji liniowej, wariantyzowanej poprzez zastosowanie i modyfikację cyklu stanowiskowego, w odniesieniu do płynności i wydajności układu z nierównomiernym rozkładem czasów operacyjnych. Badania przeprowadzono w środowisku Tecnomatix Plant Simulation na przykładzie prostego modelu linii produkcyjnej z transportem taśmowym. Dla dwóch wariantów symulacyjnych: bez cyklu stanowiskowego oraz z cyklem ustalonym dla wybranych stanowisk, przeanalizowano strukturę przepływu materiałów, rozkład obciążeń poszczególnych maszyn, czas życia produktu, przepustowość systemu oraz udział postojów i blokad. Porównanie obu wariantów umożliwiło identyfikację wąskich gardeł oraz weryfikację wpływu bilansowania linii poprzez zastosowanie cykli stanowiskowych na płynność i efektywność realizacji procesu wytwórczego. Wyniki symulacji pozwalają na sformułowanie wniosków dotyczących optymalizacji organizacji pracy oraz znaczenia równomiernego obciążenia stanowisk w systemach produkcji liniowej.

Słowa kluczowe: model symulacyjny, produkcja liniowa, cykl stanowiska roboczego, synchronizacja procesu, bilansowanie linii, Tecnomatix Plant Simulation

WPROWADZENIE

Współczesne przedsiębiorstwa produkcyjne funkcjonują w dynamicznym i konkurencyjnym otoczeniu rynkowym, w którym kluczowe znaczenie zyskuje efektywność procesów oraz elastyczność rozwiązań technologicznych. Rosnące wymagania dotyczące szybkości realizacji zamówień, minimalizacji kosztów oraz wysokiej jakości produktów wymuszają ciągłą optymalizację działań w całym łańcuchu wytwórczym. Modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi informatycznych, takich jak Tecnomatix Plant Simulation (Siemens, 2025), umożliwiają nie tylko szczegółowe odwzorowanie pracy linii, lecz także pozwalają na identyfikację wąskich gardeł, nieefektywności oraz marnotrawstwa zasobów na poszczególnych etapach procesu (Kłos, 2017).

Tendencje związane z Przemysłem 4.0 sprzyjają upowszechnianiu cyfrowych bliźniaków (ang. digital twins) oraz kompleksowych symulacji scenariuszy w środowisku wirtualnym (Gunal, 2019). Dzięki nim możliwe jest weryfikowanie

różnych rozwiązań organizacyjnych, analiza wpływu wybranych parametrów na wydajność systemu oraz eliminowanie potencjalnych problemów przed wdrożeniem zmian w przedsiębiorstwach przemysłowych. Szczególne miejsce zajmuje tu bilansowanie pracy stanowisk jako istotny element zwiększania płynności przepływu produkcji i podnoszenia stabilności linii w warunkach zmiennych obciążeń.

Dynamiczny rozwój zaawansowanych narzędzi symulacyjnych istotnie wpływa na wzrost możliwości zastosowania symulacji i wizualizacji w analizie oraz doskonaleniu systemów produkcyjnych (Burduk, Łapczyńska i Popiel, 2021; Kłos, Patalas-Maliszewska, 2019; Staley, Kim, 2012). Oprogramowanie tego typu umożliwia coraz łatwiejsze tworzenie modeli o wysokim stopniu złożoności, które wiernie odzwierciedlają zarówno strukturę, jak i sposób funkcjonowania procesów wytwórczych na różnych poziomach organizacji. W efekcie symulacje komputerowe coraz wyraźniej dominują nad tradycyjnymi modelami matematycznymi, które zazwyczaj koncentrują się na wybranym, wąsko zdefiniowanym aspekcie planowania produkcji – na przykład na znalezieniu optymalnego harmonogramu. Przewaga symulacji wynika przede wszystkim z możliwości elastycznego rozbudowywania modeli wraz ze wzrostem potrzeb analizy, a także z uwzględniania interakcji wielu podsystemów i czynników wpływających na proces produkcji (Krenczyk, Pawlewski i Plinta, 2022).

Nowoczesne oprogramowanie symulacyjne umożliwia nie tylko wierne odwzorowanie rzeczywistych warunków, lecz także prezentację wyników w postaci atrakcyjnej wizualizacji 3D, co znacznie ułatwia zrozumienie wpływu poszczególnych czynników na funkcjonowanie systemu (Grabowik i in., 2020). Ten aspekt jest szczególnie istotny z punktu widzenia decydentów, ponieważ pozwala na szybszą oraz bardziej świadomą ocenę różnych wariantów rozwiązań. Tradycyjne metody planowania produkcji oparte na modelach matematycznych, choć rygorystyczne pod względem formalnym, w praktyce przemysłowej napotykały istotne ograniczenia. Obliczenie rozwiązania pełnego modelu, uwzględniającego wszystkie zależności i ograniczenia charakterystyczne dla współczesnych, złożonych systemów produkcyjnych, jest często bardzo wymagające obliczeniowo i czasochłonne (Krenczyk, Pawlewski i Plinta, 2022). W praktyce konieczne jest więc stosowanie uproszczeń, które jednak mogą prowadzić do utraty istotnych szczegółów, utrudniając interpretację, wizualizację oraz wdrożenie uzyskanych rezultatów. Ponadto, aktualizacja złożonych modeli matematycznych w odpowiedzi na dynamicznie zmieniające się warunki funkcjonowania przedsiębiorstwa bywa trudna lub wręcz niemożliwa do przeprowadzenia w czasie rzeczywistym.

W tych warunkach techniki symulacyjne nabierają szczególnej wartości – pozwalają nie tylko na weryfikację założonych koncepcji planistycznych i modernizacyjnych, ale także pomagają zminimalizować ryzyko podjęcia nietrafnych decyzji inwestycyjnych i operacyjnych. Dzięki możliwości szybkiego testowania rozwiązań w środowisku wirtualnym, symulacja pozwala na

identyfikację wąskich gardeł i ograniczeń systemu, co ma kluczowe znaczenie dla efektywnego zarządzania procesem doskonalenia produkcji.

Celem artykułu jest szczegółowa analiza wpływu zastosowania powtarzalnych cykli pracy na efektywność procesów produkcji liniowej. Praca koncentruje się na porównaniu dwóch wariantów organizacji pracy linii: jednego bez zdefiniowanego cyklu stanowiskowego (obróbczego, ang. *cycle*) oraz drugiego z cyklem pracy przypisanym do wybranych stanowisk roboczych. Opracowanie obejmuje weryfikację przyjętych założeń na przykładzie modelu symulacyjnego zbudowanego w środowisku Tecnomatix Plant Simulation oraz ocenę, czy wprowadzenie cyklu stanowiskowego rzeczywiście przekłada się na zrównoważenie obciążeń, ograniczenie przestojów i poprawę ogólnej wydajności systemu.

PROBLEM BADAWCZY I METODYKA BADAŃ

Dla przyjętego modelu produkcji liniowej przeprowadzono dwa warianty symulacji, które różnią się sposobem organizacji pracy stanowisk roboczych:

1. Bez zdefiniowanego cyklu obróbczego: w tym wariacie każde stanowisko (maszyna) pracuje niezależnie, bez sztywno zdefiniowanego rytmu pracy (cyklu). Oznacza to, że maszyna podejmuje obróbkę kolejnej jednostki natychmiast, gdy tylko zakończy poprzednią i dostępny jest materiał z poprzedniego etapu. Każde stanowisko działa zgodnie ze swoim własnym czasem operacyjnym, a przepływ produkcji jest determinowany wydajnością poszczególnych stanowisk oraz występowaniem ewentualnych przestojów spowodowanych brakiem materiału na wejściu lub zatorami na wyjściu. Może to prowadzić do nieregularnych obciążeń stanowisk, powstawania wąskich gardeł (np. jeśli któreś stanowisko ma najdłuższy czas obróbki), nierównomiernej pracy linii oraz zwiększonej liczby przestojów dla niektórych maszyn – szczególnie tych szybszych, które muszą oczekiwać na wolniejsze stanowiska poprzedzające.
2. Z cyklem pracy przypisanym do wybranych stanowisk roboczych: tutaj dla wybranych maszyn zdefiniowany został cykl obróbczy (ang. *cycle*), czyli powtarzalny schemat czasowy wyznaczający momenty rozpoczęcia obróbki kolejnych jednostek. Praca stanowisk jest zsynchronizowana według ustalonego cyklu – maszyna rozpoczyna nową operację nie wcześniej, niż po upływie zdefiniowanego czasu cyklowego, nawet jeśli technicznie byłaby gotowa do pracy wcześniej. W praktyce dodanie cyklu polega na wprowadzeniu do modelu tzw. obiektu *cycle*, który inicjuje pracę stanowisk w określonych odstępach czasu, niezależnie od indywidualnych czasów przetwarzania. Produkcja zyskuje wtedy rytmiczny, powtarzalny charakter.

W literaturze przyjmuje się, że znaczenie tej zmiany jest istotne (Adeppa, 2015; Yilmazlar i in., 2020) z uwagi na: (1) synchronizację przepływu – stanowiska pracują bardziej równomiernie, unikając przedwczesnych startów/oczekiwania, (2) bilansowanie linii – dzięki wspólnemu cyklowi łatwiej zapobiegać

powstawaniu wąskich gardeł i kolejek na stanowiskach szybszych, (3) redukcję nieplanowanych przestojów – ogranicza się czas przestojów (tzw. „bezczynności oczekującej”, ang. *waiting time*), choć w pewnych przypadkach może to prowadzić do tzw. blokad (ang. *blocked time*), czyli sytuacji, kiedy stanowisko gotowe do pracy czeka, aż kolejne stanowisko przyjmie obrobiony detal.

Kluczowym zadaniem pozostaje zatem ocena wpływu zastosowania powtarzalnego cyklu pracy dla wybranych stanowisk roboczych na efektywność i stabilność przebiegu procesu w ramach produkcji liniowej. Praca podejmuje próbę odpowiedzi na następujące pytania badawcze:

1. W jakim stopniu synchronizacja pracy stanowisk poprzez narzucenie im powtarzalnego cyklu wpływa na płynność przepływu, rozkład obciążeń oraz efektywność całej linii produkcyjnej?
2. Czy wprowadzenie cyklu obróbczego dla wybranych maszyn pozwala ograniczyć udział przestojów oraz poprawić bilans pracy w systemie z nierównomiernym rozkładem czasów operacyjnych?
3. W jakim zakresie narzędzia symulacyjne, takie jak oprogramowanie Tecnomatix Plant Simulation, umożliwiają praktyczną weryfikację wpływu różnych metod bilansowania linii (w tym cykli stanowiskowych i ich konfiguracji) na efektywność procesu produkcyjnego w realnych warunkach operacyjnych?

Sformułowany problem badawczy pozwala na kompleksową, ilościową i jakościową ocenę skuteczności oraz zasadności wprowadzania cyklu stanowiskowego jako jednej z metod harmonizacji pracy linii produkcyjnej.

Badania są częścią projektu naukowego dotyczącego automatycznego generowania modeli symulacyjnych we wspomaganii zarządzania i sterowania systemami produkcyjnymi i zostały przeprowadzone z wykorzystaniem narzędzi symulacyjnych dostępnych w środowisku Tecnomatix Plant Simulation, które umożliwiają odwzorowanie warunków panujących w rzeczywistych systemach produkcyjnych. Do analizy wybrano prosty scenariusz produkcji liniowej, w którym zbadano wpływ dwóch sposobów organizacji pracy: bez zdefiniowanego cyklu roboczego oraz z cyklem przypisanym do wybranych stanowisk roboczych. Przyjęty schemat postępowania (por. Tabela 1) zapewnił rzeczową i powtarzalną ocenę funkcjonowania modelu, z uwzględnieniem wpływu kluczowych parametrów, takich jak czas przetwarzania czy zastosowanie synchronizacji cykli na efektywność oraz stabilność procesu.

Tabela 1 Schemat postępowania badawczego

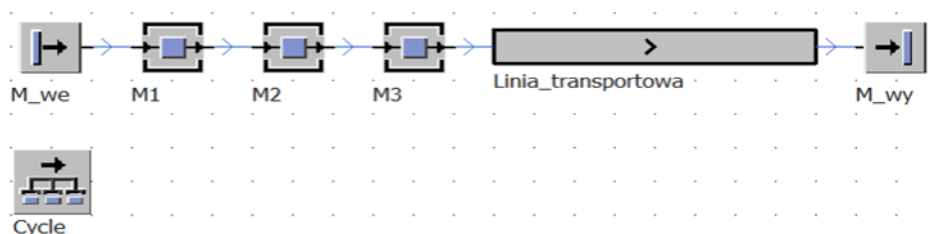
Etap	Działanie
Definicja celów badania	Celem analizy jest porównanie efektywności procesów produkcji liniowej, wariantyzowanej poprzez zastosowanie i modyfikację cyklu stanowiskowego, w odniesieniu do płynności i wydajności układu. Przedmiotem oceny jest także wpływ wybranych parametrów (czas przetwarzania, rozkład obciążeń, organizacja przepływu materiałów) na końcowe wskaźniki produktywności systemu.
Opracowanie	Opracowano prosty model procesu produkcyjnego w Tecnomatix Plant

Etap	Działanie
modeli symulacyjnych	Simulation w dwóch wariantach: - model produkcji liniowej bez zdefiniowanego cyklu roboczego, - model produkcji liniowej z przypisanym cyklem stanowiskowym.
Ustalenie warunków brzegowych	W każdym ze scenariuszy zdefiniowano parametry procesowe, takie jak: - liczba maszyn i ich układ, - czasy przetwarzania na stanowiskach, - przepustowość buforów i ich lokalizacja, - długość cyklu stanowiskowego, - długość linii transportowej, - liczba symulowanych dni roboczych.
Przeprowadzenie symulacji	Dla każdego wariantu wykonano serię testów symulacyjnych, rejestrując kluczowe parametry procesu: - przepustowość systemu (ang. <i>throughput</i>), - przepustowość godzinowa (ang. <i>throughput per hour</i> , TPH), - udziały pracy, blokady i postoju zasobów, - średni czas przetwarzania jednostki, - rozkład przepływu materiałów w systemie.
Analiza wyników	Wyniki każdej symulacji były porównywane pod kątem efektywności, ciągłości produkcji i odporności na zakłócenia. Szczególny nacisk położono na identyfikację wąskich gardeł, udziału blokad i przestojów w obydwu wariantach.
Wnioski i rekomendacje	Na podstawie zebranych danych dokonano ilościowej i jakościowej oceny skuteczności każdego modelu. Zaproponowano rekomendacje dotyczące optymalnych rozwiązań adekwatnych do zidentyfikowanych warunków.
Narzędzia i techniki	Tecnomatix Plant Simulation – środowisko budowy modeli i przeprowadzania eksperymentów symulacyjnych. Analiza porównawcza wariantów na podstawie raportów generowanych przez oprogramowanie symulacyjne. Statystyczna interpretacja wyników (m.in. porównanie przepustowości i udziałów czasów pracy/oczekiwania zasobów).

Źródło: opracowanie własne

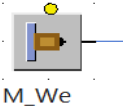
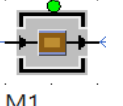
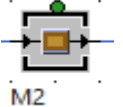
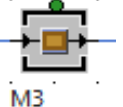
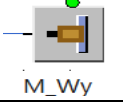
REZULTATY I DYSKUSJA WYNIKÓW

Uproszczony model trójstacyjnej linii produkcyjnej, obsługującej transport taśmowy surowców i półproduktów między poszczególnymi stanowiskami, został szczegółowo zaprezentowany na rysunku 1. Na schemacie przedstawiono wszystkie kluczowe elementy systemu, w tym magazyn wejściowy, kolejne maszyny robocze ($M1$, $M2$, $M3$), taśmę transportową oraz magazyn wyjściowy, wraz z kierunkiem przepływu materiałów i charakterystyką połączeń pomiędzy obiektami (por. Tabela 2). Dla przyjętej struktury modelu symulacyjnego przeprowadzono 24-godzinną symulację procesu produkcyjnego, odpowiadającą pełnemu dobowemu cyklowi pracy.



Rys. 1 Model symulacyjny prostej linii produkcyjnej z transportem taśmowym

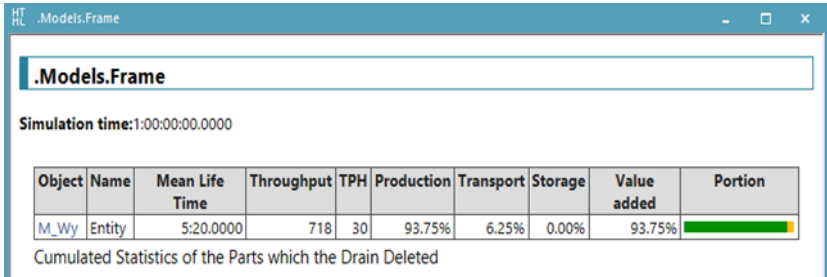
Tabela 2 Struktura modelu symulacyjnego

Obiekt	Charakterystyka obiektu
Magazyn wejścia <i>M_We</i> 	Początek procesu, interwał wyjścia 2 minuty, obiekt za każdym razem przekazuje surowce na taśmę produkcyjną, po czym zostaje zablokowany (żółty LED) – dopóki maszyna M1 nie zwolni miejsca na przyjęcie kolejnego surowca. Zasób <i>source</i> (<i>M_We</i>) generuje postój wynikający z konieczności oczekiwania na zwolnienie miejsca przez stanowisko M1.
Maszyna M1 	Obiekt otrzymuje surowiec z magazynu wejścia (<i>M_We</i>), a następnie wykonuje jego obróbkę zgodnie z ustalonym czasem jednostkowym 2 minut. Przesyła obrobiony surowiec na maszynę M2 – pod warunkiem, gdy stacja M2 pozostaje pusta (nieobłożona). Wydaje zielony LED – sygnał do gotowości.
Maszyna M2 	Obiekt otrzymuje surowiec z poprzedniego stanowiska – maszyny M1, a następnie wykonuje obróbkę surowca zgodnie z ustalonym czasem jednostkowym rzędu 2 minut. Przesyła obrobiony surowiec na maszynę M3 – pod warunkiem, gdy stacja M3 pozostaje pusta (nieobłożona). Wydaje zielony LED – sygnał do gotowości.
Maszyna M3 	Obiekt otrzymuje surowiec z poprzedniego stanowiska – – maszyny M2, a następnie wykonuje obróbkę surowca zgodnie z ustalonym czasem jednostkowym 1 minuty. Przesyła obrobiony surowiec na linię transportową. Wydaje zielony LED – sygnał do gotowości.
Linia transportowa 	Długość 8 metrów, czas 20 sekund, obiekt przyjmuje maksymalną liczbę 9 jednostek ruchomych MU z magazynu wejścia (<i>M_We</i>), po czym przesyła jednostki do magazynu wyjścia (<i>M_Wy</i>). Brak wyświetlanego koloru LED. W zależności od prędkości, linia transportowa wydłuża (1 m/s) lub skraca (3 m/s) czas procesu produkcyjnego.
Magazyn wyjścia <i>M_Wy</i> 	Koniec procesu produkcyjnego, po otrzymaniu surowca z linii transportowej obiekt nadaje sygnał do gotowości (zielony LED) i wypuszcza gotowy wyrób z procesu produkcyjnego.

Źródło: opracowanie własne

Bazowy scenariusz sytuacyjny

Podczas dobowej produkcji całkowita przepustowość systemu (ang. *throughput*) wynosi 718 szt./dzień, przy godzinowej produkcji TPH rzędu 30 szt./godz. (por. Rys. 2).



Object	Name	Mean Life Time	Throughput	TPH	Production	Transport	Storage	Value added	Portion
M_Wy	Entity	5:20.0000	718	30	93.75%	6.25%	0.00%	93.75%	

Cumulated Statistics of the Parts which the Drain Deleted

Rys. 2 Raport podstawowy symulacji przed zdefiniowaniem obiektu *cycle*

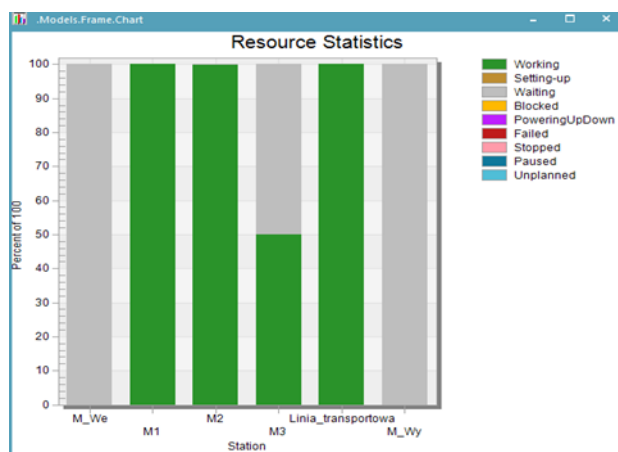
Szczegółowy raport symulacji uwzględniający udział pracy stanowisk *M1–M3*, przepływ jednostek w systemie, a także graficzną prezentację udziału zasobów w procesie produkcyjnym przedstawiono na rysunkach 3-4.

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion	Object	Number of Entries	Number of Exits
M_We	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		M_We	720	720
M1	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		M1	720	719
M2	99.86%	0.00%	0.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		M2	719	718
M3	49.86%	0.00%	50.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		M3	718	718
Linia_transportowa	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		Linia_transportowa	718	718
M_Wy	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		M_Wy	718	718

Portions of the States

Material Flow Properties

Rys. 3 Raport szczegółowy symulacji przed zdefiniowaniem obiektu cycle



Rys. 4 Udział zasobów w procesie produkcyjnym przed zdefiniowaniem obiektu cycle

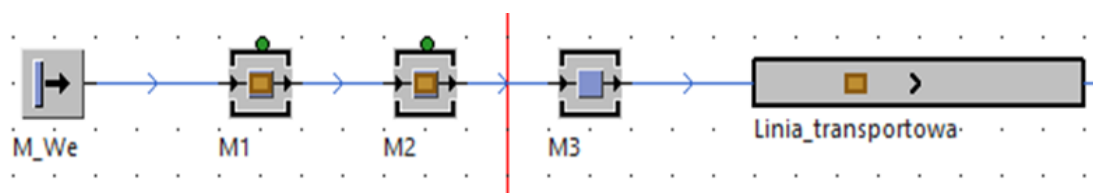
W systemie bez zdefiniowanego cyklu procesy są nierównomiernie obciążone pracą. Stanowiska *M1* i *M2* wykazują wyższy czas przetwarzania, rzędu 2 minut, niż stacja *M3* (1 minuta). Taka sytuacja powoduje, iż zasób *M3* jest zobowiązany do oczekiwania na przyjęcie surowca od stacji poprzedzających – *M1* i *M2*. W związku z tym, wzrasta udział postoju dla stanowiska *M3* (parametr *waiting time*), na rzecz spadku udziału w produkcji (parametr *working time*):

- stanowisko *M1* w związku z niższym udziałem postoju (*waiting* 0,00%), wykazuje zwiększony udział pracy (*working* 100,00%),
- stanowisko *M2* w związku z niższym udziałem postoju (*waiting* 0,14%), wykazuje zwiększony udział pracy (*working* 99,86%),
- stanowisko *M3* w związku z przeważającym udziałem postoju (*waiting* 50,14%), wykazuje zaniżony udział pracy (*working* 49,86%).

Linia transportowa, jako element nieprzerwanie obsługujący przepływ produktów, cechuje się praktycznie stałym wykorzystaniem zasobu (*working* ~100% w symulacji). Z kolei, zasobem wykazującym największy udział postoju są magazyny wejścia (*M_We*) i wyjścia (*M_Wy*) ~100% *waiting time*. Magazyny ze względu na to, iż oczekują na przyjęcie wyrobów gotowych celem składowania, wykazują zerowy udział produkcji (parametr *working*), w zamian wzrasta ich udział postoju (ang. *waiting time*).

W analizowanym modelu linia transportowa wykazuje wysokie wskaźniki wykorzystania, ponieważ obsługuje ciągły przepływ produktów – w warunkach symulacji jej parametr *working* osiągał praktycznie 100%. Dodatkowo zaobserwowano, że skrócenie długości linii transportowej (parametr *length*) skraca czas przebywania jednostek ruchomych (ang. *moving unit*, MU) na tej linii, ponieważ jednostki pokonują krótszy dystans. Jednak rzeczywisty czas opuszczenia jednostki przez taśmę może się wydłużyć, jeśli na którymkolwiek etapie wytwarzania pojawi się wąskie gardło, co prowadzi do tworzenia się kolejek i kumulacji materiału na taśmie transportowej.

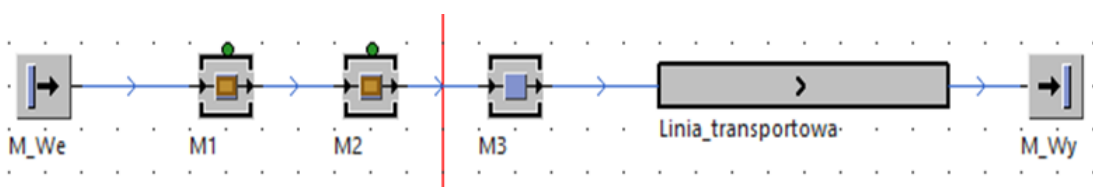
Stanowisko *M3* jest ostatnim stanowiskiem, które pośredniczy pomiędzy linią transportową. Dopóki czas przetwarzania na maszynach *M1* i *M2* nie zakończy się, stacja *M3* nie przechwyci wyrobu, celem przekazania go na linię transportową (por. Rys. 5). Maszyna *M3* oczekuje na przyjęcie jednostki MU od stanowisk *M1* i *M2* ze względu na różnicę w czasach przetwarzania (*M1, M2* – 2 min, *M3* – 1 min).



Rys. 5 Oczekiwanie stanowiska *M3* na przechwycenie wyrobu z stanowiska *M2*

Sytuacja przedstawiona na rysunku 5 prowadzi do wyraźnego wzrostu udziału czasu oczekiwania (*waiting time*) na stanowisku *M3*. W warunkach rzeczywistych, gdy dodatkowo pojawiają się czynniki losowe – takie jak awarie maszyn czy zakłócenia w dostawie materiałów – linia produkcyjna staje się szczególnie podatna na przerwy w przepływie produkcji. W praktyce może to prowadzić do wydłużenia czasu realizacji zlecenia produkcyjnego, a także zwiększa ryzyko utraty elastyczności systemu w odpowiedzi na nieprzewidziane zdarzenia.

Na skutek zaprogramowanego 24-godzinnego czasu trwania symulacji, po jej zakończeniu w układzie produkcyjnym zatrzymały się pojedyncze jednostki ruchome MU na maszynach *M1* i *M2*, pozostając w stanie nieobrobionym (por. Rys. 6).



Rys. 6 Jednostki MU pozostałe na maszynie *M1* i *M2* po zakończeniu symulacji

Stanowisko robocze *M3*, choć dysponuje najkrótszym czasem obróbki spośród wszystkich maszyn w modelu, w trakcie symulacji wykazywało niskie wykorzystanie zasobu (parametr *working* ~50%). Oznacza to, że maszyna *M3*

pozostawała w znacznym stopniu nieobciążona, często oczekując na napływ jednostek wyrobu z wcześniejszych stacji. Taki rezultat wskazuje, że przepustowość linii produkcyjnej, a tym samym tempo pracy *M3*, zostało ograniczone przez inne ogniwa systemu.

Organizacja produkcji liniowej sprawdza się szczególnie wtedy, gdy sekwencja wykonywanych operacji na poszczególnych wyrobach jest identyczna lub bardzo podobna, a czasy przetwarzania na poszczególnych stanowiskach są zbliżone. Zapewnienie tych warunków nie zawsze wymaga zmiany technologii, ale może być skutecznie osiągnięte przez właściwe zrównoważenie linii produkcyjnej, czyli odpowiednie przesunięcie operacji pomiędzy stanowiskami celem wyrównania ich obciążenia.

W drugim wariantcie analizowanego scenariusza wprowadzono dla maszyn *M1* oraz *M3* cykl obróbczy, realizowany przez odpowiedni obiekt symulacyjny, co odpowiada modyfikacji pierwotnie przyjętego scenariusza sytuacyjnego. Synchronizacja pracy tych stanowisk polegała na wymuszeniu okresowego uruchamiania operacji zgodnie z zdefiniowanym interwałem, co pozwoliło na dokładne przeanalizowanie wpływu takiego cyklu na rozkład obciążeń, płynność przepływu oraz wydajność całego procesu produkcyjnego.

Optymalizacja scenariusza sytuacyjnego (*definicja obiektu cycle*)

W modelu symulacyjnym, zrównoważenie linii produkcyjnej zostało przeprowadzone za pomocą obiektu *cycle*. Statystyki symulacyjne uwzględniające wprowadzony cykl obróbczy na maszynie *M1* oraz maszynie *M3* zostały przedstawione odpowiednio na rysunkach 7–9. Podczas dobowej produkcji całkowita przepustowość systemu wynosi 717 szt./dzień, przy godzinowej produkcji TPH na poziomie 30 szt./godz. (por. Rys. 7).

Object	Name	Mean Life Time	Throughput	TPH	Production	Transport	Storage	Value added	Portion
M_Wy	Entity	6:20.0000	717	30	94.74%	5.26%	0.00%	78.95%	

Cumulated Statistics of the Parts which the Drain Deleted

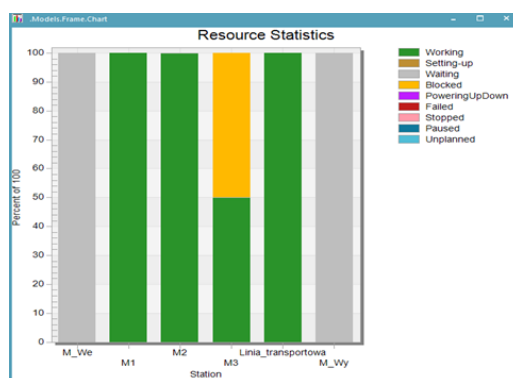
Rys. 7 Raport podstawowy symulacji po zdefiniowaniu obiektu *cycle*

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Por	Object	Number of Entries	Number of Exits
M_We	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		M_We	720	
M1	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		M1	720	
M2	99.86%	0.00%	0.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		M2	719	
M3	49.86%	0.00%	0.28%	49.86%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		M3	718	
Linia_transportowa	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		Linia_transportowa	717	
M_Wy	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		M_Wy	717	

Portions of the States

Material Flow Properties

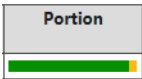
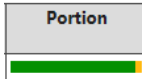
Rys. 8 Raport szczegółowy symulacji po zdefiniowaniu obiektu *cycle*



Rys. 9 Udział zasobów w procesie produkcyjnym po zdefiniowaniu obiektu *cycle*

Porównanie statystyk symulacji obydwu wariantów (przed zdefiniowaniem cyklu obróbczego oraz z przypisanym cyklem na stanowiskach roboczych) zawarto w tabeli 3.

Tabela 3 Porównanie statystyk symulacji (przed i po zdefiniowaniu cyklu obróbczego)

Parametr		Przed zdefiniowaniem cyklu obróbczego	Po zdefiniowaniu cyklu obróbczego	Wzrost/spadek parametru
Przepustowość całkowita (<i>throughput</i>) [szt./dzień]		718 szt./dzień	717 szt./dzień	1 szt./dzień ↓ (negatywna zmiana)
Przepustowość godzinowa TPH [szt./godz.]		30 szt./godz.	30 szt./godz.	bez zmian
Całkowity udział produkcji (<i>production</i>) [%]		93,75%	94,74%	+0,99% ↑ (pozytywna zmiana)
Całkowity udział transportu (<i>transport</i>) [%]		6,25%	5,26%	-0,99% ↓ (pozytywna zmiana)
Magazynowanie (<i>storage</i>) [%]		0,00%	0,00%	bez zmian
Średni czas życia jednostki MU w symulacji [min:sek]		5:20	6:20	+1:00 ↓ (negatywna zmiana)
Wartość dodana (<i>value added</i>) [%]		93,75%	78,95%	-14,80% ↓ (negatywna zmiana)
Porcjowanie materiału w bloki (<i>portion</i>)				zwiększony pasek produkcji (pozytywna zmiana)
Udział pracy (<i>working</i>) [%]	M_We	0,00%	0,00%	bez zmian
	M1	100,00%	100,00%	bez zmian
	M2	99,86%	99,86%	bez zmian
	M3	49,86%	49,86%	bez zmian
	Linia transp.	100,00%	100,00%	bez zmian
	M_Vy	0,00%	0,00%	bez zmian
Udział postoju (<i>waiting</i>) [%]	M_We	100,00%	100,00%	bez zmian
	M1	0,00%	0,00%	bez zmian
	M2	0,14%	0,14%	bez zmian

Parametr		Przed zdefiniowaniem cyklu obróbczego	Po zdefiniowaniu cyklu obróbczego	Wzrost/spadek parametru
	M3	50,14%	0,28%	-49,86% ↓ (pozytywna zmiana)
	Linia transp.	0,00%	0,00%	bez zmian
	M_Wy	100,00%	100,00%	bez zmian
Udział blokady (<i>blocked</i>) [%]	M_We	0,00%	0,00%	bez zmian
	M1	0,00%	0,00%	bez zmian
	M2	0,00%	0,00%	bez zmian
	M3	0,00%	49,86%	+49,86% ↑ (negatywna zmiana)
	Linia transp.	0,00%	0,00%	bez zmian
	M_Wy	0,00%	0,00%	bez zmian
Liczba przekazanych jednostek w symulacji (<i>material flow properties</i>) [szt./dzień]	M_We	720 szt./dzień	720 szt./dzień	bez zmian
	M1	719 szt./dzień	719 szt./dzień	bez zmian
	M2	718 szt./dzień	718 szt./dzień	bez zmian
	M3	718 szt./dzień	717 szt./dzień	1 szt./dzień ↓ (negatywna zmiana)
	Linia transp.	718 szt./dzień	717 szt./dzień	1 szt./dzień ↓ (negatywna zmiana)
	M_Wy	718 szt./dzień	717 szt./dzień	1 szt./dzień ↓ (negatywna zmiana)

Źródło: opracowanie własne

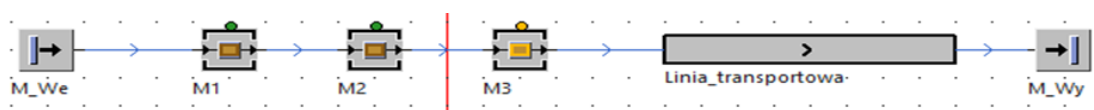
Po zdefiniowaniu cyklu obróbczego dla stanowisk roboczych *M1* i *M3* odnotowano następujące zmiany w systemie produkcyjnym:

- obiekt *cycle* synchronizuje transfer jednostek MU dla stacji *M1* i *M3*,
- obiekt *cycle* wprowadza rytmiczność do linii produkcyjnej – po zakończeniu operacji na stanowisku *M3*, jednostki MU są przekazywane do dalszych etapów dopiero wtedy, gdy *M3* opróżni swoje stanowisko, co pozwala to na utrzymanie równego rytmu pracy, zapobiegając zatorom na linii i zapewniając jej płynność, zgodnie z ideą ciągłego przepływu (ang. *one-piece flow*),
- prawidłowość funkcjonowania cyklu jest uzależniona od ciągłości połączeń typu *connector* i gotowości do przyjęcia kolejnych jednostek MU przez kolejne obiekty systemu – linia transportowa powinna być gotowa do odbioru jednostek ruchomych, a ponadto musi być zachowana ciągłość produkcji w obrębie całego modelu symulacyjnego.

Definicja cyklu roboczego na stanowiskach *M1* i *M3* spowodowała następujące zmiany w przebiegu procesu produkcyjnego: (I) spadek udziału postoju, (II) wzrost udziału blokady, (III) redukcja liczby przekazanych jednostek, (IV) wzrost całkowitego udziału produkcji, (V) wzrost średniego czasu życia jednostki.

- I. Redukcja udziału postoju (parametr *waiting time*) stanowiska *M3*, dla którego przydzielono cykl roboczy: spadek z wartości 50,14% do wartości 0,28% (pozytywna zmiana, redukcja postoju o wartość 49,86% ↓).
- II. Wzrost udziału blokady (parametr *blocked time*) stanowiska *M3* z wartości 0,00% do wartości 49,86%, powodujący zmniejszenie całkowitej przepustowości o liczbę 1 szt./dzień ↓.

Warto zauważyć, iż zdefiniowanie cyklu roboczego pozwoliło na redukcję postoju o wartość 49,86% ↓, na rzecz wzrostu udziału blokady do wartości równorzędnej 49,86% ↑ (por. Rys. 10).



Rys. 10 Model symulacyjny po zdefiniowaniu obiektu *cycle* – wystąpienie blokady

Zmiany dokonane w modelu nawzajem się równoważą:

$$\text{redukcja postoju o } 49,86\% \downarrow = \text{wzrost udziału blokady } 49,86\% \uparrow = 0,00\% \quad (1)$$

- III. W związku z odnotowanym spadkiem całkowitej przepustowości systemu z liczby 718 szt./dzień do liczby 717 szt./dzień, obniżce ulega liczba przekazanych jednostek w symulacji (ang. *material flow properties*) o liczbę 1 szt./dzień dla stanowiska *M3*, linii transportowej i magazynu wyjścia *M_Wy*.
- IV. Wzrost całkowitego udziału produkcji z wartości 93,75% do wartości 94,74%, na rzecz zmniejszenia udziału transportu z wartości 6,25% do wartości 5,26%.
- V. Wzrost średniego czasu życia jednostki MU z 5 minut i 20 sekund do 6 minut i 20 sekund oraz spadek wartości dodanej (ang. *value added*) z wartości 93,75% do wartości 78,95%.

Na podstawie uzyskanych wyników symulacji można sformułować następującą zależność: im większa przepustowość systemu produkcyjnego (ang. *throughput*), tym większa liczba produktów zostaje wytworzona w jednostce czasu i przekazana do dalszych etapów, w tym na linię transportową. Wzrost przepustowości skutkuje skróceniem średniego czasu życia produktu w systemie (ang. *mean life time*), co oznacza, że poszczególne wyroby przebywają w procesie produkcyjnym krócej, przechodząc przez linie i stanowiska w przyspieszonym tempie. W efekcie, każde stanowisko robocze obsługuje większą liczbę jednostek w tym samym czasie, co prowadzi do zwiększenia przerabianej partii (ang. *portion*) w danym interwale czasowym. Takie zależności są charakterystyczne dla zoptymalizowanych systemów produkcji liniowej, w których kluczowe znaczenie ma minimalizacja przestojów oraz maksymalne wykorzystanie potencjału przepustowego poszczególnych stanowisk i transportu.

Zatem dla uzyskania poprawy efektywności systemu należy dążyć do zwiększenia przepustowości, ale równocześnie pamiętać o możliwych ograniczeniach

wynikających z występowania wąskich gardeł, nierównomierności obciążeń oraz kosztów związanych z przyspieszonym przepływem.

Zgodnie z przyjętymi zasadami modelowania procesów produkcyjnych w środowisku Tecnomatix Plant Simulation, zdefiniowanie cyklu obróbczego dla wybranych stanowisk roboczych stanowi klasyczną metodę bilansowania linii, mającej na celu poprawę efektywności procesu poprzez zrównoważenie obciążeń i minimalizację przestojów. Takie rozwiązanie teoretycznie powinno prowadzić do równomiernego rozłożenia pracy pomiędzy poszczególne etapy produkcji, a tym samym do podwyższenia ogólnej produktywności systemu. W rzeczywistości jednak, w warunkach przyjętych do analizowanego modelu symulacyjnego, różnice w funkcjonowaniu linii produkcyjnej po wprowadzeniu cyklu obróbczego okazały się marginalne – zmiany w tak kluczowych wskaźnikach, jak przepustowość czy udział blokad i postojów, mieszczą się w granicach błędu symulacyjnego i nie prowadzą do istotnej, odczuwalnej poprawy efektywności. Oznacza to, że w przypadku prostych, dobrze zbilansowanych układów produkcyjnych, operacjonalizacja cyklu obróbczego może być niewystarczająca do osiągnięcia dalszych korzyści operacyjnych bez głębszej ingerencji w strukturę procesu lub parametry poszczególnych stanowisk. Wyniki te podkreślają znaczenie odpowiedniego doboru metod optymalizacji linii produkcyjnych, wskazując jednocześnie na konieczność indywidualnej analizy każdego przypadku w zależności od specyfiki systemu oraz zdefiniowanych warunków brzegowych.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza wariantów produkcji liniowej w środowisku symulacyjnym Tecnomatix Plant Simulation pozwoliła na szczegółowe porównanie pracy linii bez zdefiniowanego cyklu obróbczego oraz z przypisanym cyklem na wybranych stanowiskach roboczych. Szczegółowa analiza statystyczna wyników symulacji, obejmująca zarówno wariant bazowy, jak i modyfikację polegającą na synchronizacji pracy stanowisk *M1* i *M3* z wykorzystaniem cyklu obróbczego, pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. W obu wariantach zarejestrowano bardzo zbliżone wartości kluczowych wskaźników efektywności, takich jak przepustowość godzinowa (TPH) oraz całkowita liczba wyprodukowanych jednostek.
2. Wprowadzenie cyklu obróbczego znacząco ograniczyło udział przestojów na stanowisku *M3* (spadek waiting time o 49,86%), jednakże równocześnie spowodowało równoważny wzrost czasu blokowania (parametr blocked time), przy praktycznie niezmięnionej liczbie przekazanych jednostek i marginalnej zmianie efektywności systemu.
3. Średni czas życia produktu w systemie nieznacznie wzrósł, a struktura wykorzystania zasobów pozostała praktycznie niezmienną dla pozostałych stanowisk.

Marginalne znaczenie wprowadzenia cyklu (czyli synchronizacji pracy stanowisk poprzez narzucenie im określonego taktu) w zaprezentowanym modelu wynika przede wszystkim z:

- równych lub bardzo zbliżonych czasów operacyjnych stanowisk *M1* i *M2*, co minimalizuje ryzyko powstawania wąskich gardeł i kolejek w systemie bez cyklu,
- niewielkiej liczby stanowisk oraz stosunkowo prostej struktury linii, co przekłada się na płynny i łatwy do zbilansowania układ,
- braku losowych zakłóceń, zmienności czasów lub awarii w scenariuszu, które w rzeczywistej produkcji mogą ujawniać dodatkowe zalety synchronizacji cyklów.

Konstrukcja modelu symulacyjnego sugeruje, że w bardziej rozbudowanych lub różnorodnych systemach, a zwłaszcza przy zróżnicowanych czasach operacji, większej liczbie stanowisk, czy też występowaniu losowości lub zakłóceń, wprowadzenie cyklu może przynieść wyraźniejsze korzyści w postaci poprawy regularności przepływu, łatwiejszego bilansowania linii, ograniczenia ryzyka powstawania lokalnych wąskich gardeł, a także lepszej kontroli nad poziomem zapasów na poszczególnych odcinkach linii.

W badanym przypadku uproszczonego i dobrze zbilansowanego układu produkcji liniowej dodanie cyklu obróbczego przyniosło zmiany o marginalnym znaczeniu dla efektywności systemu. Fakt ten pokazuje, że w prostych, jednorodnych strukturach korzyści płynące z takiej synchronizacji mogą być ograniczone. W praktyce przemysłowej decyzja o wdrożeniu zbilansowanych cykli powinna być poprzedzona szczegółową analizą charakterystyki procesu i identyfikacją realnych źródeł zakłóceń czy dysproporcji czasowych. W bardziej złożonych lub dynamicznych systemach potencjał poprawy wydajności dzięki zastosowaniu cyklu może być znacznie większy.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was financially supported by the Opole University of Technology as part of the DELTA project no. 268/24.

LITERATURA

- Adeppa, A. (2015). A study on basics of assembly line balancing. *International Journal on Emerging Technologies*, 6(2), 294-297.
- Burduk, A., Łapczyńska, D., Popiel, P. (2021). Simulation modeling in production effectiveness improvement – case study. *Management and Production Engineering Review*, 12(3), pp. 75-85. <https://doi.org/10.24425/mper.2021.137680>
- Grabowik, C., Ćwikła, G., Kalinowski, K., Kuc, M. (2020). A comparison analysis of the computer simulation results of a real production system. In: Martínez Álvarez, F., Troncoso Lora, A., Sáez Muñoz, J., Quintián, H., Corchado, E. (Eds.), 14th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2019). *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 950, pp. 344-354. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20055-8_33
- Gunal, M. (2019). *Simulation for Industry 4.0: past, present, and future*. Springer, Cham.

- Kłos, S. (2017). The simulation of manufacturing systems with Tecnomatix Plant Simulation. Oficyna Wydawnicza UZ, Zielona Góra.
- Kłos, S., Patalas-Maliszewska, J. (2019). An analysis of the efficiency of a parallel-serial manufacturing system using simulation. In: Burduk, A., Chlebus, E., Nowakowski, T., Tubis, A. (Eds.). Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance. ISPEM 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, 835, pp. 32-43. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97490-3_4
- Krenczyk, D., Pawlewski, P., Plinta, D. (2022). Symulacja procesów produkcyjnych. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Staley, D. R., Kim, D. S. (2012). Experimental results for the allocation of buffers in closed serial production lines. International Journal of Production Economics, 137(2), pp. 284-291, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.02.011>
- Siemens (2025). Tecnomatix digital manufacturing software. <https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/>
- Yilmazlar, I. O., Jeyes, A., Fiore, A., Patel, A., Spence, C., Wentzky, C., Zero, N., Kurz, M. E., Summers, J. D., Taaffe, K. M. (2020). A case study in line balancing and simulation. Procedia Manufacturing, 48, pp. 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.076>.

Optimization of Linear Production Processes through Workstation Cycle Synchronization Using Computer Simulation

Abstract: The aim of the paper is to evaluate the effectiveness of line production processes subjected to different variants of workstation cycle organization, with particular focus on flow efficiency and overall system throughput under conditions of non-uniform processing times. The research was conducted in Tecnomatix Plant Simulation using a simple model of a belt-based production line. Two simulation scenarios were compared: a baseline version without a workstation cycle and a modified version with a set cycle applied to selected workstations. The analysis focused on material flow patterns, workload distribution across individual machines, product cycle time, system throughput, as well as the incidence of idle and blocked states. This comparison enabled the identification of bottlenecks and validated the impact of line balancing—through the use of workstation cycles—on process smoothness and overall efficiency. The simulation results allow for the formulation of conclusions regarding work organization optimization and highlight the importance of balanced workstation loads in linear production systems.

Keywords: simulation model, line production, workstation cycle, process synchronization, line balancing, Tecnomatix Plant Simulation

Patryk Machnik

Opole University of Technology
Faculty of Production Engineering and Logistics
Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, Poland
e-mail: s100769@student.po.edu.pl

Iwona Łapunka

Opole University of Technology
Faculty of Production Engineering and Logistics
Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, Poland
e-mail: i.lapunka@po.edu.pl