

MAŁOPOLSKI Waldemar

## WERYFIKACJA METODY STEROWANIA SPALETYZOWANĄ LINIĄ TRANSPORTOWĄ ZA POMOCĄ SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono problematykę sterowania spaletyzowaną linią transportową złożoną z kilku taśmociągów. Jako obiekt badań przyjęto przykładową linię wzorowaną na rozwiązaniu rzeczywistym. Badaniom poddano dwie metody sterowania: synchroniczną i asynchroniczną. Aby zweryfikować efektywność tych metod, zbudowano modele symulacyjne w programie Arena i przeprowadzono szereg symulacji.*

### WSTĘP

Ciągły rozwój gospodarki światowej a szczególnie jej globalizacja jest bezpośrednią przyczyną wzrostu konkurencji w obszarze wytwarzania dóbr konsumpcyjnych. Sytuacja ta zmusza producentów do obniżania kosztów produkcji. W krajach o wysokim poziomie rozwoju a tym samym o wysokich kosztach siły roboczej jedynym rozwiązaniem jest wprowadzanie szeroko rozumianej automatyzacji w procesach wytwórczych. Jest to jedyna alternatywa dla przenoszenia produkcji do krajów o niskich kosztach produkcji.

Szczególnie ważne jest minimalizowanie a wręcz eliminowanie, o ile to możliwe, z procesów produkcji wszystkich czynności, które nie generują wartości dodanej. Do czynności takich należą m.in. wszystkie czynności transportowe. Należy zatem dążyć do ich ograniczenia i jednocześnie do obniżenia ich kosztów. Rozwiązaniem tego problemu może być na przykład wprowadzenie zautomatyzowanych podsystemów transportowych. Ze względu na dążenie do podniesienia efektywności całego systemu produkcyjnego, często przyjmuje się pełnienie przez podsystem transportowy funkcji usługowej względem podsystemu wytwarzania [7]. Podsystemy takie muszą charakteryzować się dużą wydajnością i niezawodnością. W dużej części zastosowań wykorzystywane są taśmociągi o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych. W rozwiązaniach złożonych z kilku współpracujących ze sobą taśmociągów pojawia się problem ze sterowaniem ich pracą. Konieczne jest opracowanie efektywnych metod sterowania, które zapewnią poprawne funkcjonowanie całego podsystemu oraz minimalizację kosztów eksploatacji. Z tego względu podsystemy transportowe poddawane są działaniom zmierzającym do optymalizacji ich funkcjonowania.

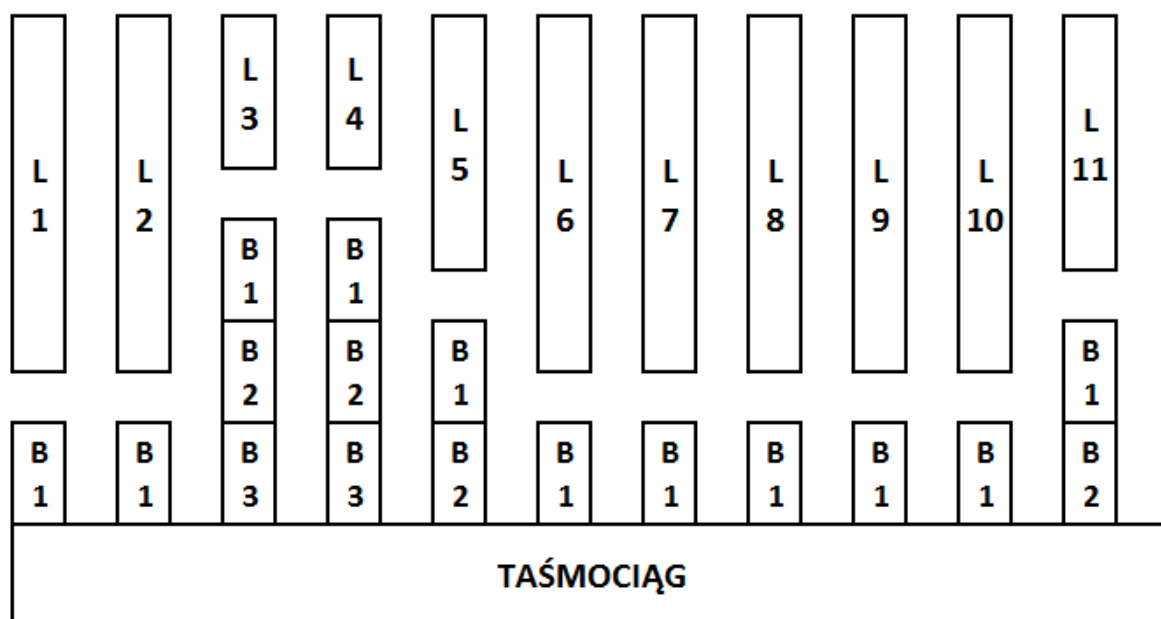
Od wielu lat są rozwijane różne metody naukowe pozwalające na poszukiwanie optymalnych rozwiązań. Są one np. przedmiotem badań operacyjnych. W ich ramach powstało wiele metod analitycznych pozwalających na sprawne poszukiwanie optymalnych rozwiązań. Metody te posiadają jednak szereg ograniczeń. Mogą być wykorzystane do rozwiązywania tylko określonych problemów z różnych dziedzin. Nie wątpliwą zaletą tych metod jest możliwość znalezienia optymalnego rozwiązania. Bardzo często ze względu na różnorodność i złożoność problemów nie można zastosować metod analitycznych. W takich

sytuacjach można próbować poszukiwać rozwiązania w wykorzystaniu chociażby metod heurystycznych [4] a w przypadku optymalizacji np. algorytmów ewolucyjnych [3]. W wielu przypadkach jedynym wyjściem jest jednak zastosowanie metod symulacyjnych. Ze względu na swoją uniwersalność mają one bardzo szerokie zastosowanie. Jednym obszarów gospodarki, którym są bardzo często wykorzystywane, jest przemysł wytwórczy [2, 5]. Metody symulacyjne są szczególnie przydatne do rozwiązywania problemów z zakresu zarządzania łańcuchem dostaw [6] oraz problemów związanych z systemami transportowymi i magazynowymi [1].

Podejście symulacyjne polega na zbudowaniu modelu istniejącego lub projektowanego podsystemu transportowego. Dzięki temu możliwe jest badanie zachowania się modelu systemu w wyniku oddziaływania otoczenia na model lub w wyniku zmian parametrów w samym modelu [8]. Wykorzystując odpowiednio zmodyfikowane modele można przeprowadzić symulacje działania podsystemu transportowego. W oparciu o symulacje modeli różnych rozwiązań możliwe jest wybranie najlepszego. Weryfikacji na drodze symulacyjnej można poddać nie tylko strukturę podsystemu transportowego ale również zakładany sposób jego sterowania.

## 1. OPIS SPALETYZOWANEJ LINII TRANSPORTOWEJ

Jako obiekt do testowania różnych koncepcji sterowania przyjęto linię transportową przedstawioną na rysunku 1, pod wieloma względami zbliżoną do pewnego rzeczywistego rozwiązania. Linia ta odbiera i transportuje palety z 11 linii produkcyjnych oznaczonych od L1 do L11. Pomiędzy liniami produkcyjnymi i taśmociągiem znajdują się bufory (od jednego do trzech). Każda linia produkcyjna ma swój takt. Produkowane wyroby są uzupełniane o określone akcesoria i pakowane na palety na końcu każdej linii produkcyjnej. Stosunek długości palety do jej szerokości i wysokości wynosi 2:1:2. Po spakowaniu palety są przemieszczane do automatycznie sterowanych buforów i tam oczekują na wjazd na taśmociąg główny, który ciągle porusza się ze stałą prędkością. Zadaniem taśmociągu jest odbieranie i transportowanie palet tak aby nie doszło do zablokowania żadnej linii produkcyjnej.

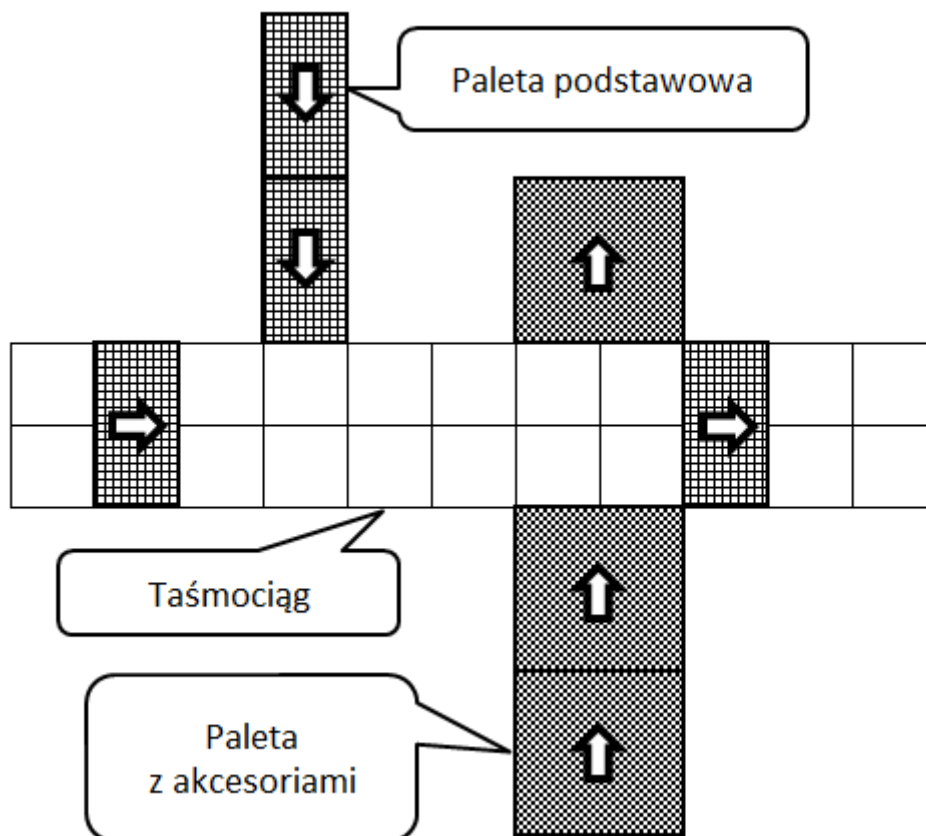


Rys. 1. Spaletyzowana linia transportowa

Źródło: opracowanie własne

Transportowane palety trafiają następnie na stanowiska foliowania, które nie są już uwzględniane w opisywanym przykładzie. Transport akcesoriów do strefy pakowania został pokazany na rysunku 2. Akcesoria są transportowane w postaci kwadratowych palet (o boku 2). Podstawą tej palety jest tekturowe opakowanie. Palety te są w całości „zużywane” w procesie pakowania palety głównej. Ze względów technologicznych do zapakowania jednej palety głównej potrzeba od 4 do 7 palet z akcesoriami. Ważne zatem jest zapewnienie wydajnego przewożenia palet z akcesoriami.

Taśmociąg przenoszący akcesoria, krzyżuje się z taśmociągiem głównym na jednym poziomie. Odpowiednie rozwiązanie konstrukcyjne pozwala na poprawne działanie obu taśmociągów.



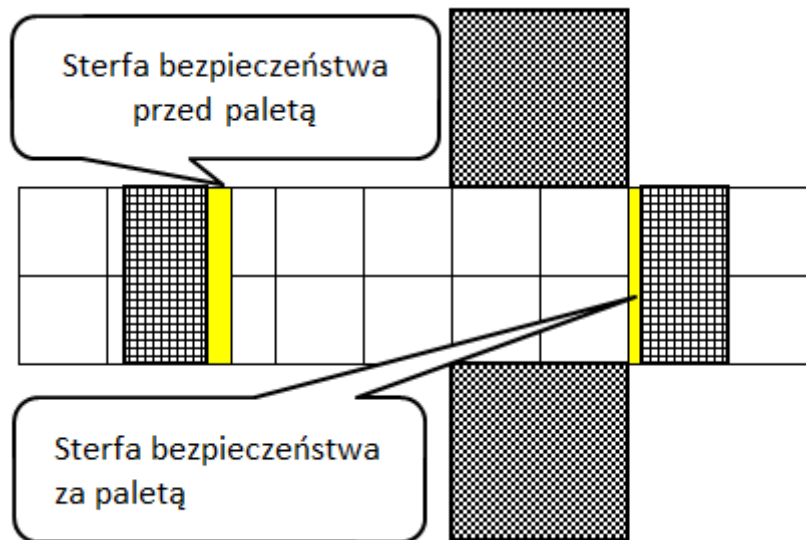
**Rys. 2.** Transport palet głównych i akcesoriów

Źródło: opracowanie własne

Bardzo ważną kwestią jest zapewnienie bezkolizyjności transportu wszystkich rodzajów palet. Aby paleta z akcesoriami zdążyła przejechać przez taśmociąg główny, pomiędzy paletami głównymi, musi być zachowana odpowiednia odległość. Ponadto nie można rozpocząć wjazdu palety z akcesoriami zaraz po przejechaniu palety głównej („na styk”). Podobnie paleta z akcesoriami powinna opuścić taśmociąg główny w bezpiecznej odległości przed paletą główną. Konieczne jest zatem wprowadzenie stref bezpieczeństwa, rysunek 3.

Wymagana odległość pomiędzy paletami głównymi będzie zależała w głównej mierze od prędkości taśmociągu głównego oraz taśmociągu z akcesoriami. W rozważanym przykładzie przyjęto dla taśmociągu głównego zakres prędkości od 10 do 18 [m/min] a dla taśmociągu z akcesoriami od 15 do 30 [m/min]. Ponadto przyjęto następujące rozmiary palety głównej: szerokość 1[m], długość 2 [m] i wysokość 2 [m]. Dla palety z akcesoriami długość boku przyjęto o wartości 2 [m]. Tym samym szerokość taśmociągu głównego wynosi 2 [m]. Przy tych założeniach można wyliczyć minimalną wymaganą odległość pomiędzy paletami

głównymi, aby możliwe było przesłanie pomiędzy nimi palety z akcesoriami.



**Rys. 3.** Strefy bezpieczeństwa na taśmociągu głównym

Źródło: Opracowanie własne

Na przykład dla następujących wartości:

$v_a = 30$  [m/min] – prędkość taśmociągu z akcesoriami,

$s_a = 4$  [m] – minimalna droga palety z akcesoriami,

$$t_a = \frac{s_a}{v_a} = 8 \text{ [s]} \text{ – czas przejazdu palety z akcesoriami} \quad (1)$$

Przy założeniu:

$v_p = 18$  [m/min] – prędkość taśmociągu głównego,

$t_p = 8$  [s] – czas ruchu palety głównej,

$$s_p = v_p * t_p = 2,4 \text{ [m]} \text{ – minimalna droga palety głównej} \quad (2)$$

Należy jeszcze uwzględnić strefy bezpieczeństwa przed i po paletce głównej (np. odpowiednio 0,3 i 0,1 [m]) oraz szerokość palety z akcesoriami (2 [m]). W rozważanym przykładzie odległość  $l_p$  pomiędzy paletami głównymi powinna wynosić

$$l_p = 0,3 + 2,4 + 2 + 0,1 = 4,8 \text{ [m]} \quad (3)$$

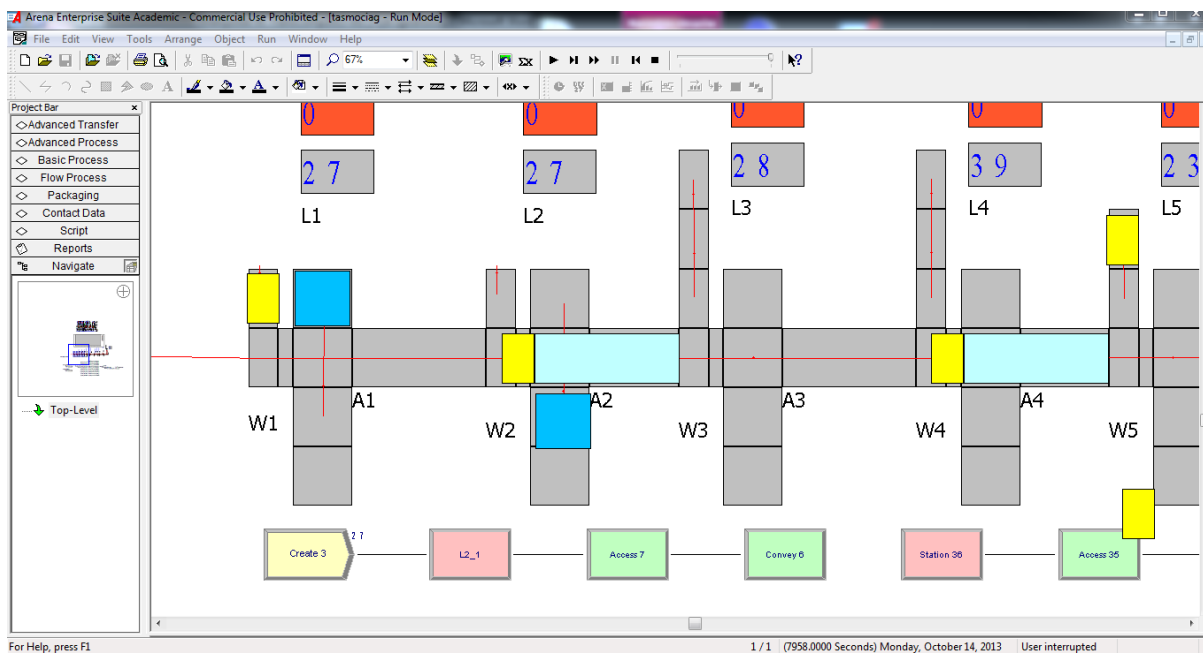
Przy założonych prędkościach i wymiarach palet odległość  $l_p=4,8$  [m] pozwoli na bezpieczne przesłanie palety z akcesoriami przez taśmociąg główny. Przy innych prędkościach uzyskamy inną odległość  $l_p$ .

## 2. WERYFIKACJA METODY STEROWANIA

Podstawowym zadaniem taśmociągu głównego jest odebranie na czas wszystkich palet oczekujących w buforach. Nie może zdarzyć się tak, że ze względu na zapełnienie buforów konieczne będzie zatrzymanie linii produkcyjnej. Ze względu na ułożenie linii produkcyjnych można przewidywać największe trudności na końcu taśmociągu. W celu zweryfikowania wydajności taśmociągu zbudowano model symulacyjny w programie Arena.

## 2.1. Model symulacyjny

Podczas budowania modelu symulacyjnego uwzględniono konieczność przesyłania palet z akcesoriami przez taśmociąg główny a tym samym wymóg zachowania określonych odległości pomiędzy paletami. Do wymiarów palety dodano jeszcze wymaganą odległość  $l_p$ . Na rysunku 4 jest przedstawiony fragment modelu symulacyjnego zbudowanego w programie Arena. Palety główne są przedstawione w postaci żółtych prostokątów, poprzedzonych jasno niebieskimi prostokątami ( $l_p$ ). Palety z akcesoriami są przedstawione w postaci niebieskich kwadratów. Po zbudowaniu modelu i zweryfikowaniu jego poprawności rozpoczęto sprawdzanie wydajności linii transportowej dla różnych wartości prędkości taśmociągu głównego i taśmociągu z akcesoriami.



Rys. 4. Fragment modelu symulacyjnego w programie Arena

Źródło: Opracowanie własne

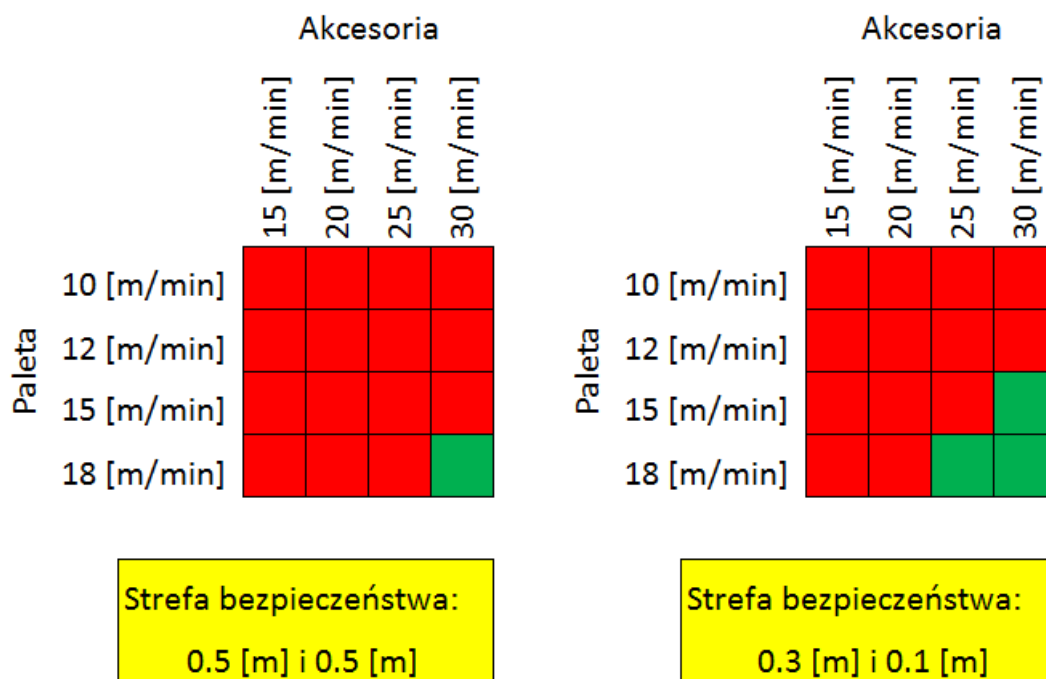
Dla taśmociągu głównego przyjmowano następujące wartości prędkości: 10, 12, 15 i 18 [m/min]. Dla taśmociągu z akcesoriami przyjmowano następujące wartości prędkości: 15, 20, 25 i 30 [m/min]. Za pomocą symulacji zbadano efektywność dwóch metod sterowania: asynchronicznego i synchronicznego.

## 2.2. Sterowanie asynchroniczne

Pierwszym badanym sposobem sterowania transportem palet było podejście asynchroniczne. Polegało ono na wpuszczaniu palety głównej na taśmociąg gdy tylko było to możliwe. To znaczy przy zachowaniu minimalnej odległości  $l_p$  pomiędzy paletami. Tym samym odległości pomiędzy paletami mogły być większe. Przy takim podejściu weryfikowano wydajność linii transportowej dla różnych wartości prędkości taśmociągów. Wyniki testów są przedstawione na rysunku 5. Na czerwono zaznaczono te kombinacje prędkości, przy których dochodziło do przepełnienia buforów a tym samym do konieczności zatrzymania linii produkcyjnych. Na zielono zaznaczono te kombinacje, przy których taśmociąg zdołał odebrać i przewieźć wszystkie palety na czas. Należy zauważyć, że nawet dla małych wartości stref bezpieczeństwa, efektywne działanie linii transportowej możliwe jest tylko w zakresie maksymalnych prędkości taśmociągów. Nie jest to rozwiązanie korzystne. Biorąc pod uwagę możliwość występowania pewnych poślizgów przy wjeżdżaniu palety głównej na taśmociąg oraz jej dużą wysokość (2[m]), korzystne byłoby obniżenie

prędkości taśmociągu głównego. Podobne uwagi dotyczą taśmociągu transportującego akcesoria.

## Sterowanie asynchroniczne



Rys. 5. Wyniki testów dla sterowania asynchronicznego

Źródło: opracowanie własne

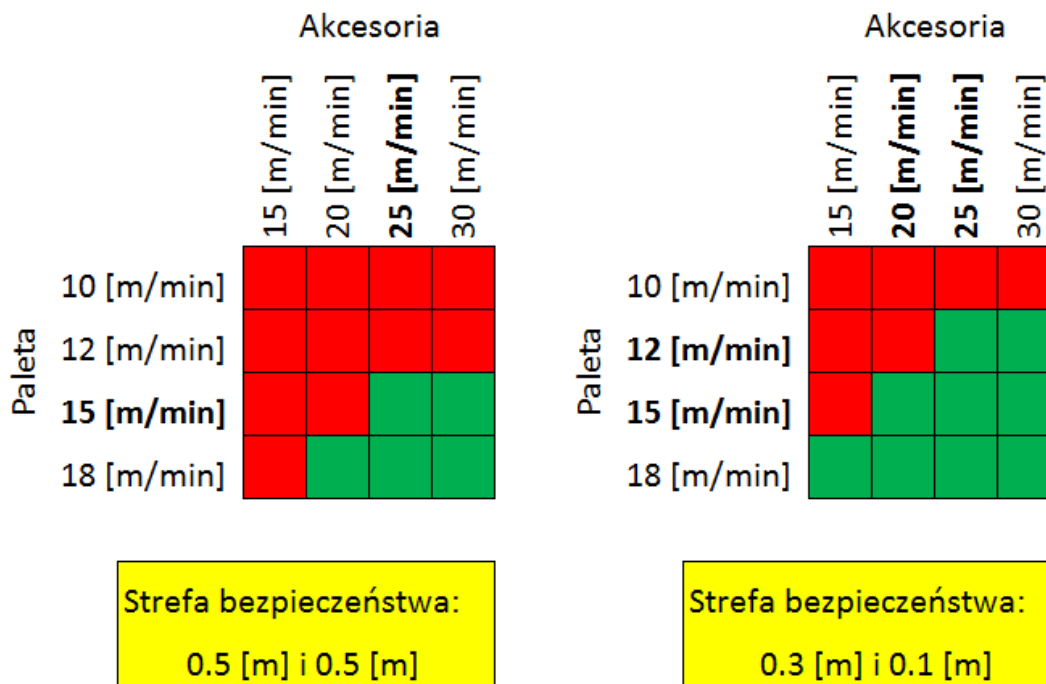
W celu poprawy efektywności sterowania zaproponowano inne rozwiązanie, polegające na wprowadzeniu pewnej synchronizacji.

### 2.3. Sterowanie synchroniczne

Aby poprawić efektywność sterowania dokonano logicznego podziału taśmociągu na segmenty o długości  $l_c$  odpowiadającej szerokości palety głównej i odległości  $l_p$ . Tym samym palety oczekujące w buforach mogą zajmować miejsce na taśmociągu tylko w określonych przedziałach (segmentach  $l_c$ ). Wykluczono w ten sposób chaotyczne zajmowanie taśmociągu przez palety. Dzięki temu palety mogą ułożyć się jedna za drugą w określonych segmentach o długości  $l_c$  przy zachowaniu odstępów  $l_p$ . Innymi słowy paleta główna może rozpocząć wjeżdżanie na taśmociąg tylko w dokładnie określonych chwilach. Jeżeli paleta się „spóźni” na wjazd do danego segmentu, to musi poczekać na następny wolny. Tym samym wszystkie wolne miejsca na taśmociągu pomiędzy jadącymi paletami mają wymiar segmentu. Dzięki temu możliwe jest lepsze wykorzystanie dostępnego miejsca na taśmociągu. Jest to szczególnie ważne dla odbierania palet z ostatnich linii.

Po takiej modyfikacji przeprowadzono ponownie szereg symulacji w celu sprawdzenia efektywności działania linii transportowej. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 6. Jak można zauważyć, uzyskano znaczną poprawę efektywności działania linii transportowej. Nawet przy dużych wartościach strefy bezpieczeństwa uzyskano obniżenie minimalnych wartości prędkości taśmociągów, przy których linia działa w sposób efektywny. Przy długości stref bezpieczeństwa wynoszących 0,5 [m] już przy prędkości taśmociągu głównego wynoszącej 18 [m/min] i prędkości taśmociągu z akcesoriami wynoszącej 20 [m/min] uzyskano wystarczającą wydajność linii transportowej. Przy zmniejszeniu stref bezpieczeństwa odpowiednio do wartości 0,3 [m] i 0,1 [m] prędkość taśmociągu z akcesoriami można jeszcze obniżyć do 15 [m/min].

## Sterowanie synchroniczne



**Rys. 6.** Wyniki testów dla sterowania synchronicznego  
Źródło: opracowanie własne

## PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule testy wykazały dużą skuteczność stosowania metod symulacyjnych do weryfikacji efektywności działania linii transportowych ze szczególnym uwzględnieniem różnych metod sterowania. Dużą zaletą takiego podejścia jest możliwość budowania modeli symulacyjnych linii transportowych na etapie ich projektowania jak też już istniejących w rzeczywistości. Dzięki temu można testować różne koncepcje bez ingerencji w obiekt rzeczywisty a tym samym wybrać lepsze rozwiązanie i obniżyć koszty.

Z dwóch różnych metod sterowania testowanych w pracy, lepszą okazała się metoda sterowania synchronicznego. Gwarantuje ona lepszą wydajność przy niższych wartościach prędkości taśmociągów. Należy nadmienić, że w rzeczywistej linii transportowej, na której częściowo była wzorowana linia opisana w artykule, zastosowano sterowanie asynchroniczne. Przy takim podejściu zastosowany algorytm sterowania jest dość skomplikowany. Do jego realizacji został napisany specjalnie dedykowany program komputerowy. Jest to rozwiązanie drogie i „zamknięte”. Przyjęcie rozwiązania opartego na sterowaniu synchronicznym pozwala na zbudowaniu układu sterowania opartego na zwykłym sterowniku PLC, czyli znacznie tańszego i „otwartego”.

## BIBLIOGRAFIA

1. Ekren B. Y., Heragu S. S., *Simulation based regression analysis for rack configuration of autonomous vehicle storage and retrieval system*, Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, pp: 2405-2413.
2. [http://www.arenasimulation.com/Solutions\\_Manufacturing.aspx](http://www.arenasimulation.com/Solutions_Manufacturing.aspx).
3. Krenich S., *Optymalna alokacja obiektów z wykorzystaniem algorytmów ewolucyjnych*, LOGISTYKA 2011, nr 3, s.1365-1375

4. Krenich S., *Pewne metody hybrydowe w jednokryterialnej optymalizacji konstrukcji*, CZASOPISMO TECHNICZNE, 4-M/2011/B, Zeszyt 7, 2011, s.255-262.
5. Liu Y., Takakuwa S., *Simulation-based personnel planning for materials handling at a cross-docking center under retail distribution environment*, Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, pp. 2414-2425.
6. Małopolski W., *Prototyp elastycznego modelu symulacyjnego systemu wytwarzania w języku SIMAN*, CEEPUS Research Reports, SOP'2008 CA Systems And Technologies, Cracow, Poland, 2008, s. 257 – 264.
7. Zając J., Chwajot G.: *Koncepcja integracji rozproszonego systemu sterowania produkcją AIM z podsystemem transportu międzyoperacyjnego zbudowanym z autonomicznych robotów mobilnych*, POMIARY - AUTOMATYKA - ROBOTYKA. PAR, Nr 2, 2011, s.392-401.
8. Zdanowicz R., Świder J., *Modelowanie i symulacja systemów produkcyjnych w programie Enterprise Dynamics*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.

## **VERIFICATION OF PALLET CONVEYOR LINE CONTROL METHOD BY COMPUTER SIMULATION**

### ***Abstract***

*The paper discusses the problem of pallet conveyor line control method. A test object, an example conveyor line (composed of several belts) is modeled on a real solution. The study involved two control methods: synchronous and asynchronous. To verify the effectiveness of these methods, simulation models were built in the Arena software.*

### ***Autor:***

dr inż. **Waldemar Małopolski** – Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Zakład Zautomatyzowanych Systemów Produkcyjnych, malopolski@mech.pk.edu.pl