

HEURYSTYCZNE PODEJŚCIE DO OPTIMALIZACJI ZDOLNOŚCI PRODUKCYJNEJ

Przemysław Korytkowski
Wydział Informatyki Politechniki Szczecińskiej
ul. Żołnierska 49, 71-210 Szczecin, pkorytkowski@wi.ps.pl

Problem optymalizacji zdolności produkcyjnej został postawiony jako zadanie optymalizacji wielokryterialnej z dyskretnymi, nieliniowymi funkcjami celu: minimalizacja czasu realizacji zamówień, maksymalizacja wykorzystania zasobów produkcyjnych, minimalizacja poziomu kooperacji. Algorytm optymalizacji wykorzystuje: metodę AHP, teorię systemów kolejkowych oraz dyskretną symulację zdarzeniową.

1. Wstęp

Informacja staje się coraz ważniejszym przedmiotem obrotu gospodarczego w Polsce i na świecie. Obserwuje się tendencję przechodzenia od gospodarki opartej na kapitale do gospodarki opartej na wiedzy, w której najważniejszymi są informacja oraz technologie informatyczne. Gospodarka oparta na wiedzy jest rozszerzeniem idei gospodarki elektronicznej, którą w dokumencie ePolska (2001) zdefiniowano jako „produkcja, reklama, sprzedaż i dystrybucja produktów poprzez sieci teleinformatyczne”.

Produkt oparty na wiedzy, istniejący w postaci cyfrowej, produkowany z użyciem technologii informatycznych oraz dystrybuowany poprzez sieci teleinformatyczne nazwano produktem niematerialnym (Laroche i in. 2001; Korytkowski, Zaikin 2004). Spośród produktów niematerialnych można wydzielić klasę produktów, które mogą być wytwarzane w systemach produkcji potokowej, jak na przykład: produkty poligraficzne, oprogramowanie, muzyka.

W przedsiębiorstwie, tak zwanej starej gospodarki (opartej na kapitale), pojawia się problem planowania zdolności produkcyjnych. Ich niedobór powoduje wydłużenie się cyklu produkcyjnego oraz zwiększenie liczby opóźnień w realizacji zamówień. Z kolei jej nadmiar powoduje niepotrzebne zwiększenie kosztów funkcjonowania systemu produkcyjnego. W przedsiębiorstwie funkcjonującym w gospodarce opartej na wiedzy te podstawowe zasady dalej są prawdziwe, ale pojawiają się nowe alternatywy np. Poprzez możliwość bliskiej kooperacji z innymi podmiotami życia gospodarczego, związane głównie z informatyzacją na poziomie produkcyjnym.

2. Sieć potokowej produkcji niematerialnej

Cechą charakterystyczną systemów produkcji niematerialnej jest wieloproduktowość. Oznacza to, że dana sieć produkcyjna pozwala na wytwarzanie różnych produktów jednocześnie.

Z punkty widzenia całego łańcucha produkcyjnego każdy jego węzeł wytwórczy (stanowisko robocze) jest systemem kolejkowym. W literaturze opisane są zasady współdziałania tych elementów (Filipowicz 1996; Gross, Harris 1998). Jednakże rozważania teoretyczne ograniczają się tylko do prostych systemów, na przykład takich, w których strumienie wejściowe i czasy obsługi są Markowskie. Większe możliwości analizy daje symulacja komputerowa, pozwala ona na modelowanie węzłów o dowolnych strumieniach wejściowych i czasach przetwarzania (Banks i in. 2001; Law, Kelton 2000).

Funkcjonowanie węzła możemy opisać jako: liczbę równoległe pracujących serwerów oraz wielkość bufora wejściowego. W przypadku linii produkcyjnej, gdy mamy do czynienia z jednostką sterującą operacją, strumień wejściowy jest potokiem operacji z poprzedniego węzła wytwórczego oraz potokiem operacji po zakończeniu kontroli, która wypadła niepomyślnie. Każda operacja lub partia operacji może znaleźć się w potoku przypadkowo z powodu, na przykład, odmowy pracy sprzętu w poprzednim węźle wytwórczym. Z tego wynika, że potok wejściowy trzeba traktować jako proces stochastyczny, w którym zdarzeniem jest pojawienie operacji, a moment pojawienia operacji na określonym interwale czasu jest procesem stochastycznym. Analizując dokładniej zakłada się, że to, co pojawia się na wejściu systemu ma charakter strumienia, który można mniej lub bardziej dokładnie opisać przy pomocy jednego z rozkładów prawdopodobieństwa. Te strumienie są dyskretne. Stochastyczny charakter ma również czas, przez jaki zadanie jest przetwarzane w węźle wytwórczym.

3. Założenie zadania optymalizacji zdolności produkcyjnej

Specyfiką przedsiębiorstwa potokowej produkcji niematerialnej jest praca na konkurencyjnym rynku oraz bliski kontakt z klientem, który może wprowadzać zmiany do zamawianego wyrobu w trakcie procesu produkcyjnego. W związku z tym decydent zarządzający systemem produkcyjnym potokowej produkcji niematerialnej przy określaniu jego zdolności produkcyjnej na poziomie planowania wydajnościowego, a więc ustaleniu liczby stanowisk roboczych oraz wielkości buforów wejściowych musi mieć na względzie przede wszystkim dwa najważniejsze czynniki: utrzymanie jak najniższych kosztów systemu produkcyjnego oraz jak najlepszą obsługę klientów. Poziom jakości obsługi klienta można mierzyć jakością wytwarzanych wyrobów oraz czasem realizacji zamówienia, czyli szybkością jego realizacji. Jakość wytwarzanych wyrobów w znacznej mierze zależy od czynników technologicznych i wdrożenia odpowiednich procedur zapewniania jakości, jak np. ISO 9001 i TQM. Na poziomie zarządzania wydajnościowego przez jakość obsługi klienta jest to czas realizacji zamówienia, który można skrócić poprzez oddanie części zadań do wykonania w ramach kooperacji. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość skrócenia maksymalnych czasów realizacji zamówień, ale wiąże się to z wyższym kosztem realizacji takiego zamówienia oraz zmniejszeniem ilości pracy, czyli obciążenia stanowisk roboczych, które do nas należą. Dlatego decydent musi podjąć decyzje, co do akceptowalnego poziomu kooperacji, której niewielka skala pozwoli podnieść poziom zadowolenia klientów, a z drugiej strony nie spowoduje znaczącego zwiększenia przestojów stanowisk roboczych. Naczelną jednak zasadą jest minimalizowanie potrzeby oddawania własnych zadań do realizacji na zewnątrz przedsiębiorstwa.

W związku z powyższym okreśmy trzy cele cząstkowe, którymi będzie się kierował decydent zarządzający zdolnością produkcyjną w potokowej produkcji niematerialnej:

- Minimalny czas realizacji zamówień
- Maksymalne wykorzystanie zasobów produkcyjnych
- Minimalizacja poziomu kooperacji

3.1 Czas realizacji zamówień

Powstaje problem z wyliczeniem cyklu produkcji zamówienia, który nie jest prostą sumą czasów przebywania zadań w węzłach wytwórczych należących do danego procesu technologicznego. Z tego powodu cykl produkcyjny zamówienia będzie wyliczany metodami symulacyjnymi z wykorzystaniem komputerowego modelu symulacyjnego danego przedsiębiorstwa produkcji niematerialnej.

Czas obsługi zadania przez węzeł wytwórczy, można wyznaczyć w oparciu o teorię systemów kolejkowych. Na ten czas składa się czas oczekiwania zadania w buforze wejściowym oraz czas obsługi przez serwer. Czas przebywania w systemie zależy od czasu obsługi zlecenia, liczba serwerów oraz od wielkości bufora wejściowego. W ogólnym przypadku nie jest możliwe wyznaczenie wprost postaci funkcyjnej. Czas realizacji zamówienia będzie najdłuższy w przypadku, gdy procesy produkcyjne będą liniowe i każdy z nich będzie się składał ze wszystkich operacji technologicznych. W takim przypadku funkcja kryterialna $T(N, m)$

będzie mieć następującą postać:
$$T(N, m) = \sum_i^n t_i(N_i, m_i).$$

3.2 Obciążenie zasobów produkcyjnych

Obciążenie sprzętu będzie rozpatrywane na poziomie: węzłów wytwórczych. Jeśli ułamek czasu, przez jaki i -ty węzeł wytwórczy wykonuje pracę oznaczymy jako ρ_i , $\rho_i \in [0,1]$, to czas, przez jaki nie pracuje ten węzeł będzie równy $1 - \rho_i$. Wartość tę należy pomnożyć przez ilość stanowisk roboczych N_i , w które wyposażony jest węzeł wytwórczy i koszt ich pracy. Kryterium dotyczące obciążenia sprzętu dla jednego węzła wytwórczego, w związku z powyższym można zapisać jako:

$$u_i = N_i(1 - \rho_i)\alpha_i$$

Dla całej sieci wytwórczej to kryterium będzie miało postać:

$$U = \sum_{i=1}^k u_i = \sum_{i=1}^k N_i(1 - \rho_i)\alpha_i$$

gdzie: $i = 1, 2, 3, \dots, k$ jest indeksem węzła wytwórczego, α_i jest współczynnikiem kosztu pracy i -tego stanowiska roboczego.

3.3 Poziom kooperacji

Dla każdego węzła wytwórczego istnieje możliwość wyliczenia prawdopodobieństwa jego zablokowania P_b , czyli zaistnienia sytuacji nowe zadanie zostanie odrzucone z węzła wytwórczego bez obsługi. P_b jest zależne, od czasu obsługi zlecenia, ilości serwerów oraz od wielkości bufora wejściowego. Prawdopodobieństwo wystąpienia konieczności kooperacji w danym węźle wytwórczym należy następnie wymnożyć przez współczynnik, który będzie określał koszt jej realizacji

$$K_i = P_{bi} \lambda_i \bar{k}_i,$$

gdzie: P_{bi} - jest prawdopodobieństwem wystąpienia kooperacji w i -tym węźle wytwórczym, \bar{k}_i - jest kosztem realizacji operacji technologicznej wykonywanej w i -tym węźle wytwórczym przez zewnętrznego podmiotu w ramach kooperacji. Poziom kooperacji dla całej sieci będzie wypadkową poziomów kooperacji na każdym z węzłów wytwórczych po uwzględnieniu intensywności obsługi w każdym z nich.

$$K = \sum_{i=1}^k K_i = \sum_{i=1}^k P_{bi} \lambda_i \bar{k}_i.$$

3.4 Ograniczenie budżetowe

Zmiana zdolności produkcyjnej wiąże się ze zmianą konfiguracji systemu produkcyjnego. W zależności od potrzeb może zaistnieć sytuacja, gdy pojawi się konieczność stworzenia nowego stanowiska roboczego lub też rezygnacji z pracy niektórych stanowisk.

$$D = \sum_{i=1}^k (|N_i - N'_i| \cdot (\delta \cdot d_i^z + (1 - \delta) \cdot d_i^u)),$$

gdzie: $\delta = \begin{cases} 1 & \text{dla } N_i \leq N'_i \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$,

N'_i - ilość stanowisk roboczych, w które ma być wyposażony węzeł wytwórczy po rekonfiguracji, N_i - ilość stanowisk roboczych, w które jest wyposażony węzeł wytwórczy przed rekonfiguracją, d_i^z - jest kosztem nabycia jednego serwera, czyli stanowiska roboczego, do j -tego węzła wytwórczego, d_i^u - jest kosztem zrezygnowania z pracy jednego serwera będącego częścią j -tego węzła wytwórczego.

Koszt rekonfiguracji sieci produkcyjnej musi być niższy lub równy budżetowi \hat{D} , który został przydzielony z planu wyższego poziomu na tę operację: $D \leq \hat{D}$

3.5 Postawienie problemu optymalizacji wielokryterialnej

Zadanie optymalizacji zdolności produkcyjnej systemu potokowej produkcji niematerialnej można przedstawić jako zadanie optymalizacji wielokryterialnej w następującej postaci.

Przy zadanych: strukturze sieci produkcyjnej, parametrach procesów technologicznych i parametrach strumieni wejściowych. Należy obliczyć zdolność produkcyjną każdego z węzłów (ilość równoległe pracujących serwerów N_i i wielkość bufora wejściowego m_i). Zapewniających minimum ustalonych funkcji kryterialnych U , T i K na interwale optymalizacji. Pod warunkiem spełnienia ograniczeń na ilość serwerów, która musi być wystarczająca do obsłużenia strumienia zgłoszeń oraz na budżet, który jest ograniczony. Zadanie przyjmie następującą postać funkcyjną: znaleźć minimum funkcji $F(N, m) = [U(N, m), T(N, m), K(N, m)]^T$, przy ograniczeniu: $D(N, m) \leq \hat{D}$.

W celu znalezienia rozwiązania optymalnego zastosowana zostanie metoda ważonej funkcji celu (Ehrgott, Wiecek 2005). Jest to jedno z najbardziej popularnych podejść, które znajduje zastosowanie w bardzo szerokim zakresie problemów. Dla przedstawionego zadania optymalizacji wielokryterialnej globalna funkcja kryterialna przyjmie następującą postać:

$$G(N, m) = w_1 \cdot U(N, m) + w_2 \cdot T(N, m) + w_3 \cdot K(N, m)$$

gdzie w_i , $i = 1, 2, 3$ są wagami określającymi względną ważność poszczególnych kryteriów składowych. Przy czym $w_i \in (0, 1)$ i $\sum_i w_i = 1$.

Wagi odzwierciedlają opinię decydenta, co do ważności celów składających się na globalną funkcję kryterialną. Najprostszym sposobem uzyskania wag jest bezpośrednio ustalenie ich przez decydenta. Niestety nie jest to zadanie proste, wynika to z ograniczenia percepcji ludzkiej. Praktyka pokazuje, że decydentowi trudno jest określić jednocześnie wzajemną ważność wielu celów. Z tego powodu opracowano wiele metod, które ułatwiają określenie preferencji decydenta. Efektywnym podejściem jest metoda AHP (Analytic Hierarchy Process) opracowaną przez Saaty'ego (Saaty 2005).

Zaletą metody AHP jest możliwość jej zastosowania do problemów, które nie muszą być mierzone w tych samych jednostkach. Tak jak jest to w opisywanym przypadku optymalizacji zdolności produkcyjnej, gdy kryterium dotyczące wykorzystania zasobów jest podawane w jednostkach pieniężnych, a kryterium dotyczące realizacji zamówienia w jednostkach czasu. Metoda AHP stosowana jest przy rozwiązywaniu bardzo różnych problemów, jak podaje sam autor metody (Saaty 2005) była ona wykorzystana w ponad tysiącu opracowań naukowych.

4. Charakterystyka zadania optymalizacji zdolności produkcyjnej

Aby móc wykorzystać wiedzę o charakterystykach węzłów wytwórczych w procesie optymalizacji zdolności produkcyjnej niezbędnym jest opracowanie funkcji, która będzie służyła do szacowania wpływu każdego z węzłów wytwórczych na globalną funkcję kryterialną $G(N, m)$. Funkcja $G(N, m)$, jest funkcją wielu zmiennych, które zgrupowane są w dwu wektorach $N = [N_1, N_2, N_3, \dots, N_k]^T$ oraz $m = [m_1, m_2, m_3, \dots, m_k]^T$. Pary zmiennych $\{N_i, m_i\}$ są parametrami jednego, i -tego węzła wytwórczego. Wprowadźmy funkcję $g_i(N_i, m_i)$, która będzie składać się z cząstkowych funkcji kryterialnych w stosunku do jednego węzła wytwórczego i będzie interpretowana jako funkcja oszacowania dla jednego węzła wytwórczego

$$g_i(N_i, m_i) = w_1 \cdot u_i(N_i, m_i) + w_2 \cdot t_i(N_i, m_i) + w_3 \cdot k_i(N_i, m_i).$$

W związku z tym można wprowadzić funkcję oszacowania globalnej funkcji kryterialnej, która przyjmie następującą postać:

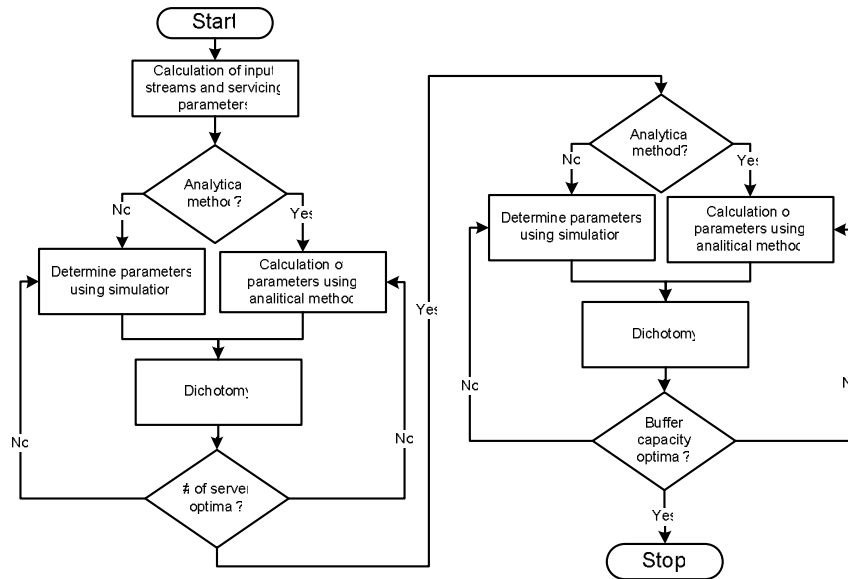
$$\tilde{G}(N, m) = \sum_i^n g_i(N_i, m_i).$$

5. Algorytm optymalizacji zdolności produkcyjnej

Wykorzystanie teorii ograniczeń oraz teorii systemów kolejkowych pozwala na opracowanie algorytmu, który będzie w stanie szybciej znaleźć optymalną konfigurację systemu produkcyjnego niż podejście oparte na losowym badaniu tegoż systemu.

W tym celu po pierwsze należy znaleźć wąski przekrój. Węzeł będący wąskim przekrojem może dostać wyznaczony na podstawie oszacowania $\tilde{G}(N, m)$ i wyliczenia wartości funkcji $g_i(N_i, m_i)$ dla każdego z węzłów. Węzeł, dla którego wartość funkcji $g_i(N_i, m_i)$ będzie maksymalna będzie wąskim przekrojem.

Następnie należy przekonfigurować węzeł wytwórczy tak, aby zminimalizować funkcję $g_i(N_i, m_i)$. Można tego dokonać poprzez zwiększenie liczby stanowisk roboczych pracujących w danym węźle i poprzez zmianę długości bufora. Procedurę wyznaczania wąskiego przekroju i jego optymalizacji należy powtarzać tak długo, jak spełnione jest ograniczenie budżetowe. Algorytm zakończy pracę, gdy okaże się, że zoptymalizowany już raz węzeł jest ponownie wąskim przekrojem systemu produkcyjnego. Schematycznie algorytm optymalizacji zdolności produkcyjnej został przedstawiony na rysunku 1. Poniżej zostanie on szczegółowo opisany.



Rys. 1. Algorytm optymalizacji zdolności produkcyjnej

5.1 Ustawienie początkowej konfiguracji

Do znalezienia węzła, który jest wąskim przekrojem systemu produkcyjnego niezbędne jest obliczenie wartości globalnej funkcji kryterialnej oraz wartości funkcji oszacować każdego z węzłów wytwórczych. W tym celu należy wykonać eksperyment symulacyjny na przygotowanym wcześniej komputerowym modelu tegoż systemu produkcyjnego wprowadzając aktualne parametry. Tymi parametrami są:

- ilość stanowisk roboczych w każdym węźle $N = [N_1, N_2, N_3, \dots, N_k]^T$,
- wielkość buforów przed każdym węzłem $m = [m_1, m_2, m_3, \dots, m_k]^T$,
- strumień zamówień klientów $ZW = [zw_1, zw_2, zw_3, \dots, zw_n]^T$,
- strumień zadań wpływających do każdego węzła w ramach kooperacji $KW^+ = [kw_1^+, kw_2^+, kw_3^+, \dots, kw_k^+]^T$,
- strumień zadań wypływających do każdego węzła w ramach kooperacji $KW^- = [kw_1^-, kw_2^-, kw_3^-, \dots, kw_k^-]^T$,
- strumień zadań wymagających poprawy $RW = [rw_1, rw_2, rw_3, \dots, rw_n]^T$,
- koszty pracy stanowisk roboczych $A = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k]^T$,
- koszty zakupu nowego stanowiska roboczego $D^z = [d_1^z, d_2^z, d_3^z, \dots, d_k^z]^T$, lub też jego usunięcia dla każdego z węzłów $D^u = [d_1^u, d_2^u, d_3^u, \dots, d_k^u]^T$,
- koszty wykonywania zadań w ramach kooperacji dla każdego węzła $\bar{K} = [\bar{k}_1, \bar{k}_2, \bar{k}_3, \dots, \bar{k}_k]^T$,
- czasy trwania operacji technologicznych T_o ,
- budżet przeznaczony na rekonfigurację systemu produkcyjnego \hat{D} .

Po wprowadzeniu do modelu powyższych parametrów, odzwierciedlających aktualną charakterystykę systemu produkcyjnego przeprowadza się eksperyment symulacyjny. Po jego zakończeniu uzyskiwane są następujące dane:

- \bar{T}^s - średni czas trwania cyklu produkcyjnego,
- ρ_i^s , $i = 1, 2, 3, \dots, k$ - poziom obciążenia stanowisk roboczych,
- P_{bi}^s , $i = 1, 2, 3, \dots, k$ - stosunek liczby zadań przekazanych do kooperacji, do liczby zadań napływających,
- t_i^s , $i = 1, 2, 3, \dots, k$ - średni czas przebywania zadań w węźle wytwórczym.

5.2 Wybór wąskiego przekroju

Podstawiając uzyskane z eksperymentu symulacyjnego dane można obliczyć aktualną wartość globalnej funkcji kryterialnej podstawiając do cząstkowych funkcji kryterialnych uzyskane wyniki. Następnie oblicza się

funkcję oszacowania $g_i(N_i, m_i)$ dla każdego węzła wytwórczego. Węzeł wytwórczy, dla którego $g_i = \max(g_1, g_2, g_3, \dots, g_k)$ będzie wąskim przekrojem.

5.3 Optymalizacja węzła wytwórczego

Dla wybranego węzła należy przeanalizować strumienie wejściowe wpływające do wąskiego przekroju. Należy wyznaczyć charakterystyki całkowitego strumienia zadań, który składa się ze strumieni przychodzących od innych węzłów wytwórczych, strumienia zadań wymagających poprawy oraz strumienia zadań przychodzących z zewnątrz w ramach kooperacji. W trakcie trwania eksperymentu symulacyjnego zbierane są dane o całkowitym strumieniu zadań przychodzących do wąskiego przekroju.

Jeśli charakterystyka przebadanego strumienia pozwala opisać go przy pomocy rozkładów: wykładniczego, erlanga lub jest deterministyczna to minimalizacja wartości funkcji oszacowania $g_i(N_i, m_i)$ będzie przeprowadzona z użyciem teorii systemów kolejkowych. W przeciwnym przypadku pozostaje wykorzystanie modelu symulacyjnego pojedynczego węzła wytwórczego. Model symulacyjny pojedynczego węzła wytwórczego jest modelem bardzo prostym, jego zaletą w stosunku do korzystania z pełnowymiarowego modelu całego systemu produkcyjnego jest możliwość uzyskania rezultatów prowadzonych eksperymentów symulacyjnych w znacznie krótszym czasie.

W związku z faktem, że zmiana liczby stanowisk roboczych wchodzących w skład węzła wytwórczego jest po pierwsze bardzo kosztowna, a po drugie przynosi największe zmiany w wartości parametrów opisujących system kolejkowy, który modeluje tenże węzeł (Zaikin, Korytkowski 2002) optymalizacja zdolności produkcyjnej węzła wytwórczego odbywać się, więc będzie w dwóch etapach:

1. Optymalizacja pod względem liczby równoległe pracujących stacji roboczych przy aktualnej wielkości bufora wejściowego.
2. Optymalizacja pod względem wielkości bufora, dla wcześniej ustalonej liczbie stanowisk roboczych.

Jak to zostało pokazane przez Zaikina i Korytkowskiego (2002) funkcje odzwierciedlające zależności czasu przebywania zadania w węźle wytwórczym i poziomu wykorzystania sprzętu od liczby równoległych serwerów i wielkości bufora wejściowego są unimodalne i wklęsłe. Podobnie jest z zależnością dotyczącą poziomu kooperacji.

W celu zachowania jednolitego podejścia do optymalizacji pojedynczego węzła wytwórczego zarówno dla metody analitycznej, wykorzystującej teorię systemów kolejkowych, jak i dla metody symulacyjnej oraz ze względu na fakt, że dla różnych konfiguracji węzłów wytwórczych w przypadku metody analitycznej składowe funkcje kryterialne będą miały różną postać, zastosowana zostanie metoda podziału przedziału na połowy. Metoda podziału przedziału na połowy (Popov 1999) jest metodą optymalizacji funkcji jednej zmiennej, która wymaga tylko możliwości wyliczenia wartości funkcji w przedziale optymalizacji. Sprowadza się ona do porównywania wartości funkcji w punktach, które leżą w 0,25, 0,5 i 0,75 długości przedziału poszukiwania ekstremum. W każdym kroku algorytmu przedział poszukiwań jest o połowę skracany.

Po zoptymalizowaniu wąskiego przekroju, jeśli budżet nie został do końca wykorzystany można przystąpić do następnej iteracji algorytmu, czyli ponownego wyszukania wąskiego przekroju. Algorytm optymalizacji zdolności produkcyjnej zakończy pracę, gdy:

1. Zostanie wykorzystany cały przeznaczony na ten cel budżet.
2. Jako wąski przekrój zostanie wskazany węzeł, który był już wcześniej uznany za wąski przekrój i jest już zoptymalizowany.

Jeśli przyjmie \hat{N} za maksymalną ilość stanowisk roboczych w ramach każdego z węzłów wytwórczych, a \hat{m} za maksymalną wielkość bufora wejściowego to, aby znaleźć optymalną zdolność produkcyjną należałoby przebadać $(\hat{N} \cdot \hat{m})^k$ konfiguracji systemu produkcyjnego, gdzie k jest ilością węzłów wytwórczych. Wykorzystanie opracowanego algorytmu pozwala znaleźć zadowalające rozwiązanie znacznie szybciej, albowiem po przeanalizowaniu $2k \cdot (-\log_{0,5}(\hat{N}) - \log_{0,5}(\hat{m}))$ konfiguracji systemu produkcyjnego, pod warunkiem, że zoptymalizowane będą wszystkie węzły wytwórcze.

6. Zakończenie

Zaproponowany algorytm jest algorytmem heurystycznym. Znajomość systemu produkcyjnego pozwala na szybsze znalezienie optymalnej konfiguracji systemu produkcyjnego niż z użyciem zazwyczaj stosowanych metod optymalizacyjnych, które nie wykorzystują tej wiedzy. Dla stanowisk, których nie obsługują bezpośrednio ludzie istnieje możliwość dynamicznej zmiany przydziału zasobów do węzłów wytwórczych. Z tego powodu czas reakcji na zmiany zachodzące w systemie produkcyjnym musi być porównywalny z czasem przebywania zadań w buforze.

Literatura

- Banks, J., J. Carson, B. Nelson (2001) *Discrete-event System Simulation*, 3rd edition, Prentice Hall, New York.
- Ehr Gott, M., M.M. Wiecek (2005) Multiobjective programming, w Figueira, J., S. Greco, M. Ehr Gott (red.) *Multiple criteria decision analysis*, Springer, New York, p. 667-722.
- ePolska - Plan działań na rzecz rozwoju społeczeństwa informacyjnego w Polsce na lata 2001-2006*, 11-09-2001 r. <http://www.kbn.gov.pl/cele/epolska.html>.
- Filipowicz, B. (1996) *Modele stochastyczne w badaniach operacyjnych: analiza i synteza systemów obsługi i sieci kolejkowych*, WNT, Warszawa.
- Gross, D., C.M. Harris (1998) *Fundamentals of Queuing Theory*, 3 ed., Wiley & Sons, New York.
- Korytkowski, P., O. Zaikin (2004) Zarządzanie zdolnością produkcyjną w produkcji niematerialnej, w R. Kulikowaki et al. (red.) *Badania Operacyjne i Systemowe 2004, Podejmowanie Decyzji, Podstawy Metodologiczne i Zastosowania*, Exit, Warszawa, p. 207-218.
- Laroche, M., J. Bergeron, C. Goutaland (2001) A Three-Dimensional Scale of Intangibility, *Journal of Service Research*, Volume 4, No. 1, 26-38.
- Law, A.M., W.D. Kelton (2000) *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, Boston.
- Popov, O. (1999) *Metody numeryczne i optymalizacja*, Politechnika Szczecińska, Szczecin.
- Saaty, T.L. (2005) "The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making", w Figueira, Greco, Ehr Gott (red.) *Multiple Criteria Decision Analysis*, Springer, New York, 345-405.
- Smith J.J. (1994) *TOC and MRP II, From Theory to Results*, Bradley University, Peoria Illinois, www.rogo.com/cac/JJSmith.html.
- Zaikin O., P. Korytkowski (2002) „Basic workflow model at distributed intelligent production and its verification”, w *Advanced Computer Systems*, J. Soldek, J. Pejas (red.), Kluwer Academic Publishers, Boston, p. 161-170.