

Jacek Wrodarczyk

Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach

DWUKRYTERIALNY MODEL WYZNACZANIA STRUKTURY PRODUKCJI PRZEDSIĘBIORSTWA NA PODSTAWIE TEORII OGRANICZEŃ

Wprowadzenie

Określenie opłacalności produkcji jest jednym z ważniejszych problemów, jakie muszą rozwiązywać współcześni menedżerowie. W klasycznym ujęciu problem polega na optymalizacji struktury produkcji wobec istniejących ograniczeń przedsiębiorstwa w celu maksymalizacji zysku. Liczne obserwacje zachowań menedżerów dowodzą, że podejmując decyzje nie ograniczają się wyłącznie do analizy zyskowności poszczególnych produktów, gdyż ze względu na zmieniającą się sytuację rynkową trudno jest precyzyjnie oszacować popyt na każdy z produkowanych wyrobów. To z kolei powoduje, że starają się oni tak zaplanować produkcję, by móc w elastyczny sposób reagować na zmiany sytuacji rynkowej. W niniejszej pracy zaprezentowano model uwzględniający dwa kryteria decyzyjne – sumę przerobu wynikającą z wybranej struktury produkcji oraz ilość czasu pracy stanowisk potrzebnego do osiągnięcia tego wyniku, co ma na celu zobrazowanie relacji wyników do poniesionych nakładów. W teorii ograniczeń słowo „ograniczenie” określa zasób bądź zasoby przedsiębiorstwa, których ilość jest mniejsza niż popyt na te zasoby, czyli zasób ograniczający możliwość generowania zysku. Z uwagi na fakt, że w badaniach operacyjnych termin ten rozumiany jest odmiennie, w pracy dla oznaczenia takiego zasobu wykorzystywać będziemy określenie „waskie gardło” (bottleneck). Popyt na zasoby jest pochodną popytu na produkty. Teoria ograniczeń, stworzona przez Goldratta, izraelskiego fizyka, zaprezentowana została w książce „The Goal”¹. Zakłada ona, że każde przedsiębiorstwo posiada przynajmniej jedno ograniczenie, które limituje maksymalny możliwy do osiągnięcia zysk. Na tej podstawie

¹ E. Goldratt: The Goal Croton-on-Hudson. North River Press, New York 1984.

skonstruowane zostały pierwsze modele, pozwalające na znalezienie optymalnego rozwiązania w sytuacji, gdy w przedsiębiorstwie istnieje tylko jedno ograniczenie. Algorytm ten, zweryfikowany przez Leube i Fincha² oraz Pattersona³, przedstawiono w rozdziale 2. Niestety, w przypadku gdy istnieje więcej niż jedno ograniczenie, metoda ta daje rozwiązanie nieoptymalne lub nawet niedopuszczalne, co pokazali Balakrishan i Cheng⁴. Próbę rozwiązania problemu wyboru struktury produkcji przy występowaniu wielu ograniczeń problemu podjęli Fredendall i Lea⁵, którzy wykorzystali koncepcję „dominującego wąskiego gardła”, czyli zasobu najbardziej przeciążonego. Metoda ta przewidywała nadanie priorytetu produktom najbardziej opłacalnym, zgodnie z „dominującym wąskim gardłem”, tworząc w ten sposób wstępną strukturę produkcji, a następnie stopniowe poprawianie rozwiązania poprzez badanie sąsiednich rozwiązań. Wadą tego algorytmu jest czasochłonność obliczeń oraz wysoki stopień skomplikowania. Ponadto, jak udowodnili Aryanezhad i Komijan⁶, zastosowanie tego algorytmu nie zawsze prowadzi do uzyskania rozwiązania optymalnego. Autorzy ci zaproponowali własny algorytm opierając się na idei „dominującego wąskiego gardła”. Zrezygnowali jednak z analizy rozwiązań sąsiednich, a zamiast tego zaproponowali wykorzystanie mechanizmu tworzącego na wstępie osobne rozwiązania metodą klasyczną, po jednym dla każdego z wąskich gardel. Następnie dzięki mechanizmowi wymiany produktów w tych rozwiązaniach poprawia się wynik. Inne rozwiązanie problemu zaproponowali Aryanezhad, Komijan i Makui⁷. Zastosowali oni model liniowy do określenia zagregowanych wag produktów. Następnie zaproponowali rozważenie możliwych wymian produktów w strukturze produkcji. Obliczając wartość wzrostu lub spadku zysku wskazuje się, dla których produktów należy skorygować wielkość produkcji i w jakim stopniu. Zaprezentowany przez nich algorytm nie gwarantuje uzyskania rozwiązania optymalnego wyznaczonego za pomocą metod programowania liniowego.

² R. Leube and B. Finch: Theory of Constraints and Linear Programming: A Comparison. „International Journal of Production Research” 1992, Vol. 30(6), s. 1471-1478.

³ M.C. Patterson: The Product-mix Decision: A Comparison of Theory of Constraints and Labor-based Management Accounting. „Production and Inventory Management Journal” 1992, Vol. 33(3), s. 80-85.

⁴ J. Balakrishan and C.H. Cheng: Theory of Constraints and Linear Programming: A Re-examination. „International Journal of Production Research” 2000, Vol. 38(6), s. 1459-1463.

⁵ L.D. Fredendall and B.R. Lea: Improving the Product Mix Heuristic in the Theory of Constraints. „International Journal of Production Research” 1997, Vol. 35, s. 1535-1544.

⁶ M.B. Aryanezhad and R.A. Komijan: An Improved Algorithm for Optimizing Product Mix Under the Theory of Constraints. „International Journal of Production Research” 2004, Vol. 42, s. 4221-4233.

⁷ A.R. Komijan, M.B. Aryanezhad and A. Makui: A New Heuristic Approach to Solve Product Mix Problem in A Multi Bottleneck System. „Journal of Industrial Engineering International” 2009, Vol. 5(9), s. 46-57.

Wszystkie zaprezentowane podejścia opierają się na podstawowym założeniu maksymalizacji zysku. W praktyce gospodarczej menedżerowie rozważając rozwiązanie problemu struktury produkcji biorą pod uwagę jednak większą liczbę kryteriów niż tylko zysk w analizowanym okresie. W artykule przedstawiono model dwukryterialny, którego kryteria to maksymalizacja zysku przy minimalizacji nakładów. Kryteria te są zgodne z ogólną teorią Goldratta, który właśnie relację wykorzystania czasu pracy wąskiego gardła i przerobu traktuje jako wyznacznik opłacalności produktu. W proponowanym modelu wzięto pod uwagę także czynnik kosztu uruchomienia produkcji wyrobu oraz czas potrzebny na przezbroyenie gniazda produkcyjnego. Te istotne warunki były w przedstawianych wcześniej pracach pomijane.

W rozdziale 1 przedstawiono podstawowe założenia teorii ograniczeń oraz zaproponowaną przez Goldratta metodę wyznaczania optymalnej struktury produkcji. W rozdziale 2 – propozycję modelu dwukryterialnego do obliczenia optymalnej struktury produkcji w sytuacji, gdy liczba wąskich gardeł przekracza jeden, w 3 przeprowadzono analizę przypadku.

1. Optymalizacja struktury produkcji w ujęciu klasycznej teorii ograniczeń

Głównym założeniem modelu przedsiębiorstwa zaproponowanego przez teorię ograniczeń jest badanie wpływu wyboru konkretnych wariantów decyzyjnych na rentowność całego przedsiębiorstwa. Fakt istnienia ograniczeń, czyli czynników uniemożliwiających przedsiębiorstwu rozwój i zwiększenie sprzedaży wymusza na kadrze kierowniczej zastosowanie konkretnych narzędzi pozwalających na poprawę wydajności przedsiębiorstwa. Ten system poprawy wydajności przedsiębiorstwa został przez Goldratta nazwany „five steps of focusing”⁸. Pierwszym krokiem jest „ZIDENTYFIKUJ ograniczenie(-a) systemu” – podstawą znalezienia rozwiązania jest zdefiniowanie problemu co oznacza, że analizę przedsiębiorstwa należy rozpocząć od identyfikacji i opisanie ograniczeń. Krok drugi to „Zdecyduj, jak WYEKSPLOATOWAĆ ograniczenie(-a)” – w celu poprawy wydajności całego przedsiębiorstwa konieczne jest podjęcie działań, które pozwolą poprawić wydajność ograniczenia, przykładowo poprawić wydajność najmniej wydajnego gniazda produkcyjnego poprzez skrócenie czasu przebrojeń bądź niedopuszczanie do występowania przestojów. Poprawę wydajności można uzyskać także dzięki częściowej wstępnej

⁸ E. Goldratt: Op. cit.

obróbce detalu przed gniazdem będącym ograniczeniem. Trzeci krok to „PODPORZĄDKUJ wszystko powyższej decyzji” – z chwilą, kiedy określona została maksymalna wydajność ograniczenia należy dostroić cały proces produkcyjny do tej właśnie wydajności. Szczególnie gniazda znajdujące się przed ograniczeniem nie powinny produkować więcej niż ograniczenie jest w stanie przetworzyć, ponieważ będzie to powodowało stałe powiększanie się zapasów przed wąskim gardłem. Oczywiście należy przewidzieć odpowiedni bufor bezpieczeństwa, aby awaria maszyny pracującej przed ograniczeniem nie doprowadziła do zatrzymania produkcji na gnieździe będącym ograniczeniem. Krok czwarty określony został jako „PODNIEŚ wydajność ograniczenia” – dopiero po ustawieniu czasu cyklu produkcyjnego zgodnie z wydajnością ograniczenia można rozważać jego likwidację. Może to polegać na kolejnej zmianie produkcyjnej w gnieździe, które jest ograniczeniem lub inwestycji w kolejne urządzenie niezbędne do przeprowadzenia procesu w tym gnieździe. Ostatni krok brzmi „Jeśli w krokach 2-4 ograniczenie zostało przełamane, WRÓĆ do kroku 1; nie pozwól, by ograniczeniem stała się INERCJA”. Bardzo istotnym elementem Teorii Ograniczeń jest ciągłość procesu doskonalenia przedsiębiorstwa nazwana przez Goldratta „process of ongoing improvement”.

Zidentyfikowanie ograniczenia umożliwia ustalenie struktury sprzedaży pozwalającej na zmaksymalizowanie zysku firmy. Twórca teorii opisując sytuację przedsiębiorstwa korzysta z kilku podstawowych charakterystyk: CCR – Capacity-Constrained Resource. Jest to wydajność zasobu, który ogranicza całkowitą wydajność systemu, tzw. wąskie gardło.

1. TVC – Totally Variable Cost. Koszty, które wzrastają wraz z każdą wyprodukowaną jednostką (materiały, płaca akordowa, prowizja)

2. OE – Operating Expenses. Wszystkie wydatki, które ponosi przedsiębiorstwo niezależnie od wielkości produkcji oprócz TVC (płace oprócz stawek akordowych, energia, reklama i marketing, logistyka).

3. I – Investments. Inwestycje, nakłady ponoszone jednorazowo, pozwalające na pozytywną zmianę któregoś z pozostałych czynników (nowa, wydajniejsza maszyna, nowy kanał sprzedaży)

4. S – sales – sprzedaż wyrażona w jednostkach monetarnych.

5. T – Throughput – przerób wyrażony w jednostkach monetarnych

$$T = S - TVC$$

Przerób należy więc rozumieć jako ilość pieniędzy, które zostaną na koncie przedsiębiorstwa po sprzedaży danej grupy produktów i opłaceniu materiałów.

Teoretyczny model finansowy przedsiębiorstwa wygląda następująco⁹

$$\text{ZYSK} = T - \text{OE} - I$$

Wartość przerobu limitowana jest przez wydajność wąskiego gardła (CCR) dla ograniczeń wewnętrznych albo przez wartość popytu lub kontyngentu dla ograniczeń zewnętrznych.

Wartości wymienionych wyżej charakterystyk są łatwe do uzyskania, dzięki czemu model jest łatwy w konstrukcji, a jednocześnie pozwala na globalną analizę wariantów decyzyjnych, dzięki czytelnemu kryterium decyzyjnemu, czyli wartości zysku.

Na potrzeby analizy wariantów decyzyjnych analizowane są jedynie czasy przetwarzania konkretnych produktów na wąskim gardle (CCR).

Rozważmy przykład przedsiębiorstwa produkującego trzy wyroby: A, B i C. W przedsiębiorstwie zidentyfikowano pojedyncze gniazdo produkcyjne będące wąskim gardłem. W tabeli 1 przedstawiono koszty zmienne, jednostkowy czas wytwarzania w gnieździe będącym wąskim gardłem oraz wielkość popytu.

Tabela 1

Dane dotyczące przykładowego przedsiębiorstwa

Lp.	Produkt	Materiały koszt (TVC)	Czas CCR (min)	Popyt (szt.)
1	A	9,00 zł	2,9	100
2	B	16,00 zł	2,5	50
3	C	1,00 zł	1,2	70

Celem analizy jest nie tylko określenie, jakie ilości każdego wyrobu należy wyprodukować, ale również kolejności w jakiej produkty te powinny być wytwarzane. Chodzi o to, by produkty najbardziej opłacalne były produkowane w pierwszej kolejności tak, by jakiegokolwiek zakłócenia w pracy wąskiego gardła w najmniej dotkliwy sposób oddziaływały na wynik finansowy firmy.

Przykładowy model na podstawie założenia teorii ograniczeń przedstawiono w tabeli 2¹⁰.

⁹ T. Corbett: *Finanse do góry nogami*. MintBooks, Warszawa 2007.

¹⁰ J. Wrodczyk: *Modelowanie działalności przedsiębiorstw produkcyjnych w oparciu o Teorię Ograniczeń*. International Dimensions in Economics Karwacka K., Łódź 2010.

Tabela 2

Model Teorii Ograniczeń

Lp.	Produkt	Koszt materiałów (TVC)	Czas CCR (min)	Popyt (szt.)	Ilość wyprodukowana (szt.)	Suma Czas (min)	Cena (S)	Przerób (T = S – TVC)	T/Czas CCR	Suma Przerobu
1	A	9,00 zł	2,9	100	100	290	20,00 zł	11,00 zł	3,79 zł	1100,00 zł
2	B	16,00 zł	2,5	50	50	125	24,00 zł	8,00 zł	3,20 zł	400,00 zł
3	C	1,00 zł	1,2	70	54	64,8	4,00 zł	3,00 zł	2,50 zł	162,00 zł
		SUMA				479,8				1662,00 zł
	Dostępny CCR:			480 min						
	CCR wolne			0,2 min			Zysk = $\sum (T * \text{Ilość}) - \text{OE}$			162,00 zł
	Koszty dzienne (OE)			1500,00 zł						

Dostępny czas pracy wąskiego gardła to 480 minut. Na pytanie, które produkty są bardziej opłacalne i które powinny być produkowane w pierwszej kolejności, aby przedsiębiorstwo osiągnęło maksymalny zysk pomaga odpowiedzieć kryterium „T/Czas CCR”. Jest to ilość pieniędzy, jakie generuje sprzedaż danego produktu w odniesieniu do jednostki czasu pracy wąskiego gardła, a co za tym idzie – całego zakładu. Im wyższa wartość tego kryterium, tym bardziej opłacalna jest produkcja danego produktu. W sytuacji gdy nie jest możliwe wyprodukowanie wszystkich produktów, na które jest popyt, przedsiębiorstwo powinno skoncentrować się na produktach o najwyższym wskaźniku „T/Czas CCR”, a w następnej kolejności wytwarzać te o mniejszej wartości wskaźnika. Oznacza to, że do rozwiązania tego problemu stworzony został wektor $[A, B, C]$ – w pierwszej kolejności należy wykorzystać dostępne zasoby do produkcji produktu A (wartość T/Czas CCR = 3,79 zł), następnie do produkcji produktu B (wartość T/Czas CCR = 3,20 zł), a dopiero na końcu produktu C (wartość T/Czas CCR = 2,50 zł). Czasu pracy wąskiego gardła w analizowanym przykładzie wystarcza na wytworzenie 100 jednostek produktu A ($2,9 \text{ minuty} \times 100 \text{ szt.} = 290 \text{ minut}$), 50 jednostek produktu B ($2,5 \text{ minuty} \times 50 \text{ szt.} = 125 \text{ minut}$), a ponieważ pozostały czas (65 minut) pozwala na wyprodukowanie jedynie 54 jednostek produktu C, to rozwiązaniem optymalnym jest 100 jednostek produktu A, 50 jednostek produktu B, 54 jednostki produktu C. Pozostałe do dyspozycji 0,2 minuty nie wystarczą już na wytworzenie żadnego z produktów. Zysk osiągnięty z tej struktury produkcji, po odliczeniu kosztów operacyjnych (OE = 1500 zł), wyniesie 162 zł. Kolejność w jakiej produkty zostaną wytworzone ma znaczenie w sytuacji, gdy istnieje ryzyko zmniejszenia dostępnego czasu pracy wąskiego gardła. Jeżeli dostępny czas będzie mniejszy, to wytwarzanie produktów w kolejności od najbardziej do najmniej opłacalnego pozwoli zminimalizować straty. Dostępność czasu może być mniejsza m.in. z powodu awarii, złej jakości materiałów czy błędów operatora.

2. Model wielokryterialny

Dotychczas prezentowane metody rozwiązania problemu koncentrowały się na wskazaniu struktury o najwyższej opłacalności z punktu widzenia osiąganego zysku. Jednak w praktyce gospodarczej menedżerowie analizując ten problem biorą pod uwagę również inne czynniki niż tylko zysk. Biorąc pod uwagę złożoność problemu opłacalności produktów, zasadne wydaje się wykorzystanie mo-

delu wielokryterialnego do jego rozwiązania. W prezentowanym poniżej modelu autor proponuje wykorzystanie dwóch kryteriów: kryterium zysku (sumy przerobu) oraz kryterium minimalizacji czasu potrzebnego do produkcji.

Struktura proponowanego modelu

1. Zmienne:

$i = (1, 2 \dots n)$,

n – liczba produktów,

$j = (1, 2 \dots m)$,

m – liczba wąskich gardeł,

x_i – liczba sztuk produktu i znajdującego się w strukturze produkcji,

y_i – zmienna binarna określająca, czy produkcja produktu i została uruchomiona,

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } i\text{-ty produkt jest wytwarzany} \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym} \end{cases}$$

v_i – wartość przerobu dla każdej sprzedanej jednostki produktu i ,

u_i – koszt uruchomienia produkcji produktu i ,

w_{ij} – czas wytwarzania jednostki produktu i na wąskim gardle j ,

s_{ij} – czas przezbroyenia wąskiego gardła j do produkcji produktu i ,

b_i – maksymalny popyt na produkt i ,

c_j – dostępny czas pracy wąskiego gardła j .

2. Funkcje celu:

a) funkcja celu maksymalizująca zysk

$$\sum_{i=1}^n v_i x_i - \sum_{i=1}^n u_i y_i \rightarrow \max$$

b) funkcja celu minimalizująca czas przetwarzania produktów na wąskich gardłach, wraz z czasami przezbroyen

$$\sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n w_{ij} x_i + \sum_{i=1}^n s_{ij} y_i \right) \rightarrow \min$$

3. Ograniczenia:

a) ograniczenie dostępnego czasu pracy wąskich gardeł

$$\sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + \sum_{i=1}^n s_{ij}y_i \leq c_j \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, n \text{ oraz } j = 1, 2, \dots, m$$

b) ograniczenie popytowe

$$\frac{1}{b_i}x_i - y_i \leq 0 \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, n$$

c) $0 \leq x_i \leq b_i$, x_i – całkowite dla $i = 1, 2, \dots, n$

d) y_i jest zmienną binarną:

$$y_i \in \{0,1\} \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, n$$

3. Przykład numeryczny

Przyjmijmy, że przedsiębiorstwo produkuje cztery produkty: R, S, T oraz U. Popyt, cena sprzedaży, koszt materiałów przedstawione są w tabeli 3.

Tabela 3

Dane produktów w przykładzie numerycznym

Produkt	Popyt (D)	Cena (S)	Koszt materiału (TVC)	Przerób (T)	Koszt uruchomienia produkcji (U)
R	70 szt.	100 zł	20 zł	80 zł	300 zł
S	60 szt.	120 zł	60 zł	60 zł	200 zł
T	50 szt.	110 zł	60 zł	50 zł	150 zł
U	150 szt.	50 zł	20 zł	30 zł	100 zł

Przerób (T) wyznaczony został jako różnica pomiędzy ceną a kosztem materiałów dla każdego produktu.

Przedsiębiorstwo posiada siedem gniazd produkcyjnych: A, B, C, D, E, F oraz G. Czas przetwarzania każdego z produktów na każdym z gniazd produkcyjnych, maksymalną wydajność każdego z nich oraz czas pracy niezbędny do zaspokojenia całego popytu na produkty przedsiębiorstwa przedstawia tabela 4.

Tabela 4

Czasy przetwarzania produktów na gniazdach produkcyjnych

Produkt (i)	Zasób (j)						
	A	B	C	D	E	F	G
R	20	5	10	0,005	5	5	20
S	10	10	5	30	5	5	5
T	10	5	10	15	20	5	10
U	5	15	10	5	5	15	0,005
Czas dostępny (C_i)	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Wymagany czas pracy	3250	3450	3000	3300,35	2400	3150	2200,75
Różnica	-850	-1050	-600	-900,35	0	-750	199,25
Wąskie gardło?	TAK	TAK	TAK	TAK		TAK	

Z przedstawionych danych wynika, że gniazda produkcyjne A, B, C, D oraz F są wąskimi gardłami – ich dostępny czas pracy jest mniejszy niż czas potrzebny do przetworzenia wszystkich produktów, na które jest popyt. Zasób E nie jest wąskim gardłem, gdyż czas potrzebny na przetworzenie wszystkich produktów na tym zasobie jest równy czasowi dostępnemu – możliwe jest wykonanie wszystkich operacji na tym zasobie. Problem jaki należy rozwiązać to określenie struktury produkcji produktów R, S, T i U dla których suma przerobu będzie maksymalna.

Dane dotyczące czasów przebrojeń gniazd produkcyjnych będących wąskimi gardłami zaprezentowano w tabeli 5.

Tabela 5

Czasy przebrojeń produktów na gniazdach produkcyjnych

Produkt (i)	Czasy przebrojeń (s_{ij})				
	Zasób (j)				
	A	B	C	D	F
R	300	300	150	210	120
S	300	300	150	210	120
T	180	135	105	180	105
U	75	120	60	135	60

Rozwiązując zadanie programowania liniowego otrzymano następujące rozwiązanie modelu dla pierwszej funkcji celu zaprezentowano w tabeli 6.

Tabela 6

Wartości zmiennych decyzyjnych w rozwiązaniu

Produkt (i)	x_i	y_i
R	70	1
S	0	0
T	0	0
U	108	1

Analizując rozwiązanie można zauważyć, że optymalna struktura produkcji z punktu widzenia pierwszej funkcji celu (maksymalizacji przerobu) to R: 70 szt., S: 0 szt., T: 0 szt. oraz U: 108 szt. Wartość przerobu wynosi wtedy 8840 zł, koszt uruchomienia produkcji to 400 zł, z czego wynika wartość pierwszej funkcji celu 8440 zł. Wartość drugiej funkcji celu dla tego rozwiązania to 9730 roboczominut.

Aby zaprezentować rozwiązanie dla obu funkcji celu, przyjęto różne wartości dostępnego, sumarycznego czasu pracy odpowiadające liczbie pracowników zatrudnionych w zakładzie. Decyzją, jaką podejmuje menedżer nie jest jedynie określenie struktury produkcji gwarantującej maksymalny zysk. Często pod uwagę bierze się takie czynniki, jak elastyczność oraz zlecenia, na które może liczyć w przyszłości. Dlatego zasadne jest wzięcie pod uwagę wariantów decyzyjnych ograniczających zysk na rzecz innych kryteriów – w tym przypadku wykorzystania zasobów produkcyjnych.

Maksymalnie do pracy przy zasobach będących ograniczeniami zatrudnionych może być pięciu pracowników (suma 12 000 roboczominut), minimalnie jeden (2400 roboczominuty). W myśl idei maksymalizacji zysków przy jednoczesnej minimalizacji nakładów decydent powinien wybrać jedno z proponowanych rozwiązań. Jeden zatrudniony pracownik to 2400 minut dostępnego czasu pracy. Zakłada się, że przy mniejszej liczbie pracowników produkcyjnych obsługujących zasoby będące ograniczeniami równoważy się ich obciążenie metodami równoważenia linii produkcyjnej. Wyniki zaprezentowane zostały w tabeli 7.

Tabela 7

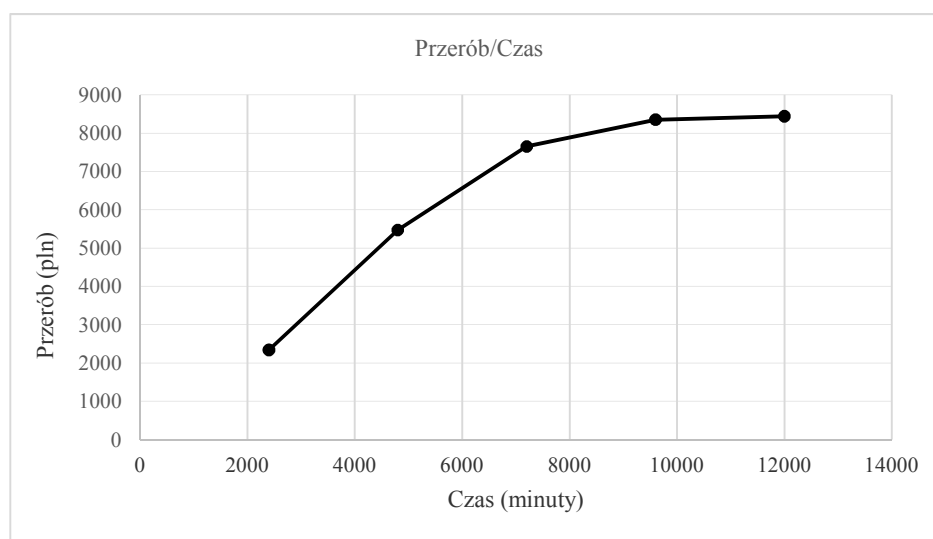
Wynik analizy dwukryterialnej

Liczba pracowników	Czas (min.)	Przerób	R	S	T	U
5	12000	8440	70	0	0	108
4	9600	8350	70	0	0	105
3	7200	7650	70	0	50	0
2	4800	5470	70	0	0	9
1	2400	2350	33	0	0	0

W zależności od maksymalnego dostępnego czasu pracy (ilości pracowników) możliwa do produkcji ilość produktów zmienia się, a co za tym idzie, zmienia się także optymalna struktura produkcji. Wynik otrzymany w formie krawędzi sprawnej przedstawiony został na wykresie 1.

Wykres 1

Wynik analizy dwukryterialnej



Przedstawiony wykres dobrze obrazuje zależność między przerobem a wykorzystanym czasem produkcji – w miarę dodawania do struktury produkcji coraz mniej opłacalnych produktów maleje zysk krańcowy uzyskiwany z minuty pracy. Ta zależność jest bardzo istotna dla menedżerów.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono dwukryterialny model pozwalający na określenie optymalnego mixu produktów w sytuacji, gdy w przedsiębiorstwie występuje więcej niż jedno wąskie gardło. Dotychczas stosowane algorytmy nie uwzględniały takich czynników działalności przedsiębiorstw produkcyjnych, jak koszt uruchomienia produkcji czy czasy przebrożeń gniazd produkcyjnych.

W dalszych pracach rozważa się rozbudowę modelu o kolejne kryteria decyzyjne, mające na celu zwiększenie przydatności modelu w praktyce gospodarczej, a także uzupełnienie o prawdopodobieństwo wystąpienia awarii i analizę wpływu takiego ryzyka na rozwiązanie.

Literatura

- Aryanezhad M.B. and Komijan R.A.: An Improved Algorithm for Optimizing Product Mix Under the Theory of Constraints. „International Journal of Production Research” 2004, Vol. 42.
- Balakrishnan J. and Cheng C.H.: Theory of Constraints and Linear Programming: A Re-examination. „International Journal of Production Research” 2000, Vol. 38(6).
- Corbett T.: *Finanse do góry nogami*. MintBooks, Warszawa 2007.
- Fredendall L.D. and Lea B.R.: Improving the Product Mix Heuristic in the Theory of Constraints. „International Journal of Production Research” 1997, Vol. 35.
- Goldratt E.: *The Goal Croton-on-Hudson*. North River Press, New York 1984.
- Goldratt E. and Fox R.: *The Race*. North River Press, New York 1986.
- Goldratt E.: *What is this Thing Called Theory of Constraints and how should it be Implemented?* North River Press, Great Barrington, Massachusetts 1990.
- Hsu T.C. and Chung S.H.: The TOC-based Algorithm for Solving Product Mix Problems. „Production Planning and Control” 1998, Vol. 9(1).
- Komijan A.R., Aryanezhad M.B. and Makui A.: A New Heuristic Approach to Solve Product Mix Problem in A Multi Bottleneck System. „Journal of Industrial Engineering International” 2009, Vol. 5(9).
- Leube R. and Finch B.: Theory of Constraints and Linear Programming: A Comparison. „International Journal of Production Research” 1992, Vol. 30(6).
- Patterson M.C.: The Product-mix Decision: A Comparison of Theory of Constraints and Labor-based Management Accounting. „Production and Inventory Management Journal” 1992, Vol. 33(3).
- Wrodarczyk J.: *Modelowanie działalności przedsiębiorstw produkcyjnych w oparciu o Teorię Ograniczeń*. International Dimensions in Economics Karwacka K., Łódź 2010.

TWO-CRITERIA MODEL OF PRODUCT MIX BASED ON THE THEORY OF CONSTRAINTS

Summary

Production structure problem, also known as product mix problem (PMP) has been in the area of interest of many researchers. Among many different ways to solve this problem, theory of constraints (TOC) is one of the more frequently chosen ones. However this solution is not universal and in some cases does not generate an optimal solution. In this paper a multi-criteria integer model has been introduced to enhance the concept. Thanks to a thorough analysis of the problem, model can be used both in the companies that have identified the one and only constraint as well as companies that characterize with multi-constraint environment.