

Edward RADOSIŃSKI*, Jacek ZABAWA*

SYMULACJA JAKO METODA ANALIZY ZAGADNIENIA PROGRAMOWANIA PRODUKCJI

Na podstawie badań eksperymentalnych pokazano możliwości symulacji komputerowej jako metody analizy problemów związanych z programowaniem produkcji. Wyniki eksperymentów zaprezentowano w postaci wielowymiarowych wykresów i tabelarycznych zestawień funkcji celu (wyniku finansowego) w zależności od czasu, wysokości zleceń produkcyjnych, zamówień surowców, ceny wyrobów. Wykazano, że racjonalnie przygotowane eksperymenty symulacyjne umożliwiają wyznaczenie zestawów zmiennych decyzyjnych, prowadzących do osiągnięcia zadowalających wartości funkcji celu.

Słowa kluczowe: *programowanie produkcji, badania operacyjne, symulacja, system wspomagania decyzji, planowanie eksperymentu, analiza prognozy rentowności*

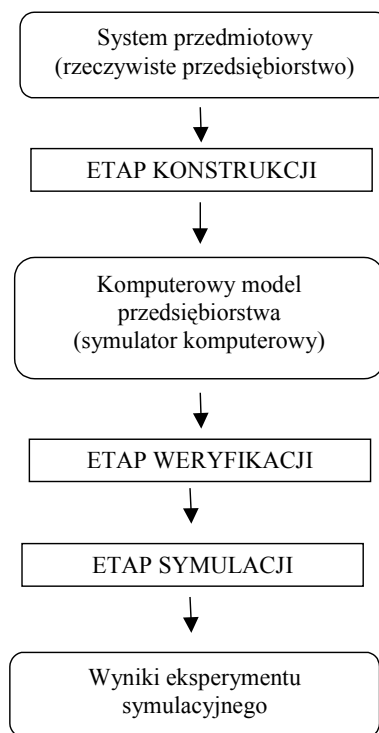
1. Znaczenie symulacji w programowaniu produkcji

W zarządzaniu przedsiębiorstwem przemysłowym kluczowym zagadnieniem jest sformułowanie właściwego programu produkcji. Wytwarzane wyroby powinny spełniać oczekiwania potencjalnych nabywców pod względem ich charakterystyki użytkowej oraz żądanej ceny sprzedaży. Cena ta powinna zapewnić wolumen sprzedaży takich rozmiarów, aby wpływy finansowe nie tylko pozwalały na pokrycie kosztów produkcji, ale także dawały godziwy zysk właścicielom przedsiębiorstwa. Skala produkcji powinna odpowiadać możliwościom zbytu wyrobów, aby producent był w stanie w pełni wykorzystać popyt, jaki oferuje rynek zarówno w perspektywie krótko-, jak i długoterminowej. W programowaniu produkcji można zatem wyróżnić następujące kluczowe problemy:

* Instytut Organizacji i Zarządzania, Politechnika Wrocławska, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Edward.Radosinski@pwr.woc.pl; Jacek.Zabawa@pwr.wroc.pl

- asortymentowe planowanie produkcji,
- wyznaczanie prognozy rentowności,
- planowanie rozwoju zdolności produkcyjnych.

Do analizy i rozwiązania tego typu zagadnień klasyczna szkoła ilościowa proponuje metody stanowiące kanon badań operacyjnych [11]. Metody te mają jednak liczne ograniczenia, co w sposób znaczący obniża ich praktyczną użyteczność. W niniejszym artykule zaproponowano metodę symulacyjną jako alternatywny sposób wyznaczania asortymentowego planu produkcji, prognozy rentowności oraz programowania działalności inwestycyjnej. Podejście to jest oparte na koncepcji teorii decyzji. W metodzie symulacyjnej rzeczywisty system ekonomiczny (przedsiębiorstwo) zastępujemy pewnym analogiem pojęciowym, którym jest model systemu, a zamiast eksperymentu realnego wykonywany jest zastępczy eksperyment myślowy, zwany eksperymentem naśladowczym lub symulacyjnym (łac. *simulamen* – naśladowanie). Jeżeli symulację stosujemy do badania skutków podjętych decyzji, a z takim przypadkiem mamy do czynienia w programowaniu produkcji, to w postępowaniu badawczym wyróżniamy trzy etapy: konstrukcji, weryfikacji i symulacji (rys. 1). Faza konstrukcji



Rys. 1. Etapy postępowania badawczego w metodzie symulacyjnej

polega na zbudowaniu modelu przedsiębiorstwa, czyli zaproponowaniu specyficznego zapisu informacji o systemie będącym obiektem badań. Przeprowadzając odpowiednie testy na etapie weryfikacji (z wykorzystaniem metody bilansowej) [9], sprawdza się, czy symulator w sposób poprawny odwzorowuje te aspekty funkcjonowania przedsiębiorstwa, które obrano jako przedmiot badań. Należy zaznaczyć, że w przypadku modeli systemów ekonomicznych weryfikacja nie jest oceną ich prawdziwości, lecz analizą ich naukowości z punktu widzenia przyjętych kryteriów. Pomyślnie zweryfikowany symulator może być wykorzystany w eksperymentach symulacyjnych (etap symulacji), mających na celu predykcję zachowania się organizacji gospodarczej odwzorowanej w modelu.

2. System Ek_An_ jako narzędzie analizy decyzyjnej

W referowanych badaniach podstawowym narzędziem badawczym było komputerowe laboratorium badań ekonomicznych Ek_An_ [10]. Kluczowym elementem systemu Ek_An_ jest model matematyczny wirtualnego przedsiębiorstwa, za pomocą którego można przeprowadzać predykcyjne eksperymenty symulacyjne. W trakcie tych eksperymentów symulowany jest wpływ realizacji określonych scenariuszy decyzyjnych na krótko- i długookresowe kształtowanie się podstawowych wyników ekonomicznych firmy. W przypadku systemu Ek_An_ ogólna mnogościowa postać symulatora predykcyjnego jest następująca:

$$M = (T, G, U, Z, f),$$

gdzie:

- T – uporządkowany liniowo przez relację niewiększości \leq zbiór liczbowy chwil, czyli $[t_p, t_k] \subset T \subset R^+$, przy czym:
 - t_p – początek eksperymentu symulacyjnego,
 - t_k – koniec eksperymentu symulacyjnego,
 - R^+ – zbiór dodatnich liczb rzeczywistych;
- $G = \{g = (g_1, \dots, g_n)\}$ jest przestrzenią wartości zmiennych egzogenicznych w eksperymencie symulacyjnym; G jest pewnym zadaniem podzbiorem przestrzeni R^n , której wymiar n jest zgodny z liczbą zmiennych egzogenicznych, gdzie $j \in \{1, 2, \dots, j, \dots, n\}$;
- $U = \{u(t) = (u_1(t), \dots, u_n(t))\}$. Dany element u zbioru U (zwany segmentem lub trajektorią wejściową) jest n -elementową charakterystyką czasową zmiennych wejściowych. Określony na zbiorach T oraz G segment u jest przekształceniem T w G dla jakiegoś przedziału $[t_p, t_k]$ będącego dziedziną u , czyli że $u: [t_p, t_k] \rightarrow G$;

$Z = \{z = (z_1, \dots, z_m)\}$ jest zbiorem stanów przedsiębiorstwa, przy czym $Z \subset R^m$, gdzie m – liczba wyróżnionych zmiennych stanu, $l \in \{1, 2, \dots, 1, \dots, m\}$;

f – funkcja przejścia stanu będąca przekształceniem $f: Z \times U \rightarrow Z$.

Funkcja przejścia stanu symulatora predykcyjnego jest dana w postaci zbioru kilkudziesięciu nieliniowych, uwikłanych i niestacjonarnych równań różniczkowych typu przyczynowego. Równania przyczynowe odwzorowują dynamiczne zależności między wyróżnionymi kategoriami ekonomiczno-finansowymi przedsiębiorstwa. Poza równaniami przyczynowymi w skład modelu matematycznego wchodzi równania definicyjne. Równania te są w swej formie statyczne i umożliwiają obliczenie wybranych kategorii ekonomiczno-finansowych na podstawie wartości innych kategorii w tym samym momencie czasowym. W wyniku transformacji różniczkowo-różnicowych stos równań został przekształcony w algorytm, możliwy do rozwiązania metodą całkowania iteracyjnego – w tym przypadku metodą Runge–Kutty [3].

Po skonstruowaniu modelu i jego pozytywnej weryfikacji (za pomocą zmodyfikowanej metody bilansowej) symulator predykcyjny został użyty do eksperymentalnych badań problemów, związanych między innymi z programowaniem produkcji. Eksperyment badawczy z wykorzystaniem systemu Ek_An_ składa się z trzech faz:

- określenia zbioru danych wejściowych,
- wykonania przebiegu symulacyjnego,
- wygenerowania zbioru danych wyjściowych.

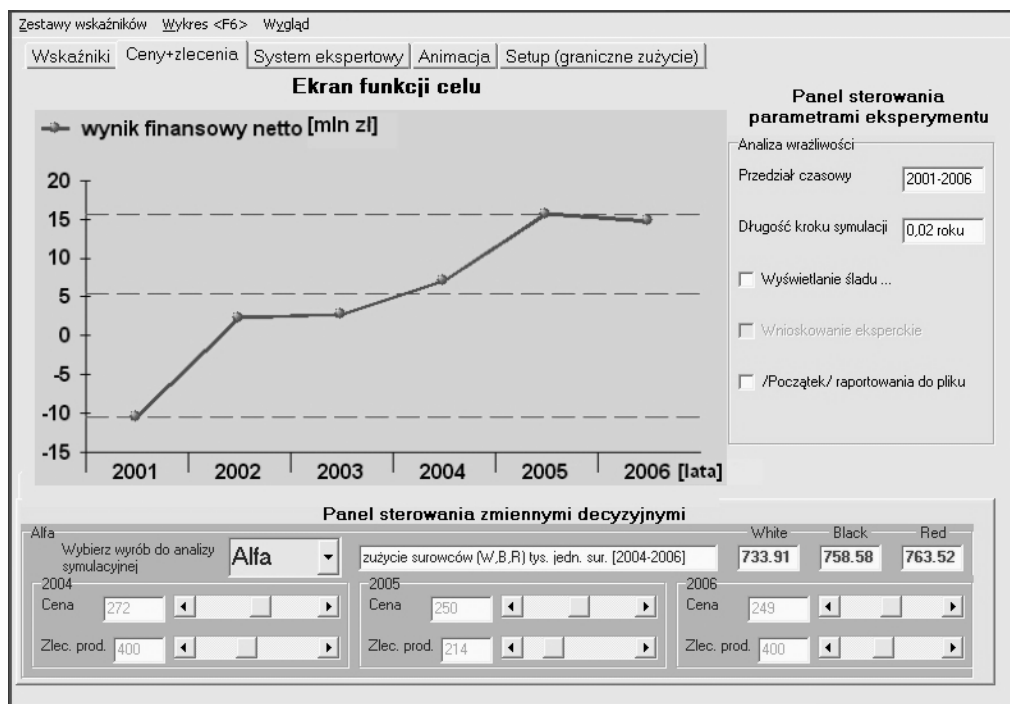
Najważniejszym elementem zestawu danych wejściowych jest zbiór zmiennych decyzyjnych, w którym zakodowane są decyzje ekonomiczno-finansowe, podejmowane na szczeblu zarządu firmy. Przedmiotem decyzji mogą być na przykład płace, rozpoczęcie nowych zadań inwestycyjnych, podział zysku. W skład zbioru zmiennych decyzyjnych wchodzi także parametry istotne z punktu widzenia problemu programowania produkcji, czyli zamówienia produkcyjne, zamówienia surowców, ceny sprzedaży wyrobów gotowych. Zbiór danych wejściowych zawiera ponadto parametry, na które działania zarząd firmy nie ma bezpośredniego wpływu, opisujące otoczenie przedsiębiorstwa (stopy oprocentowania, stawki podatków, ceny zakupu komponentów do produkcji itp.), dostępne technologie produkcji. Przed rozpoczęciem eksperymentów należy także dobrać horyzont czasowy symulacji i długość pojedynczego kroku symulacyjnego.

Po skompletowaniu zbioru danych wejściowych uruchamiany jest eksperyment symulacyjny z wykorzystaniem modelu przedsiębiorstwa. Symulacja ma charakter ciągle-dyskretny. Oznacza to, że w zbiorze $T = [t_p, t_k] \subset R^+$ wyróżniono podzbiór $T_d \subset T$; $T_d = \{t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots, t_l\}$. W chwilach przynależnych do zbioru T_d symulacja ciągle jest przerywana i wykonywane są subalgorytmy przetwarzania zdarzeń dyskretnych (np. oddawanie inwestycji do eksploatacji, spłata kolejnej raty kredytu inwestycyjnego). Po wykonaniu ostatniej iteracji eksperyment symulacyjny jest zakończony, a jego wyniki przekazywane do modułu danych. Wykorzystując specjalny podsystem prezentacji wyników symulator generuje raporty w formie tabel i wykresów. Tabele

ilustrują sytuację przedsiębiorstwa jako konsekwencję realizacji przyjętych decyzji. Opis sytuacji ekonomiczno-finansowej firmy generowany przez system Ek_An_ zawiera charakterystyki najważniejszych sfer działalności przedsiębiorstwa, w tym marketingowej, inwestycyjnej, finansowej, produkcyjnej. System emituje podstawowe sprawozdania ekonomiczne, takie jak: bilans, rachunek zysków i strat, sprawozdanie z płynności finansowej czy zestawienia kosztów.

W celu analizy sformułowanych we wstępie do artykułu zagadnień opracowano specyficzną odmianę systemu Ek_An_, tzw. system Ek_An_Pro. Oprogramowanie Ek_An_Pro jest wyposażone w odmianę interfejsu (rys. 2), ułatwiającą przeprowadzenie eksperymentów mających na celu programowanie struktury asortymentowej produkcji. Ekran interfejsu jest podzielony na następujące pola:

- panel sterowania zmiennymi decyzyjnymi,
- panel sterowania parametrami eksperymentu,
- ekran prezentacji charakterystyki funkcji celu.



Rys. 2. Interfejs systemu Ek_An_Pro

Za pomocą panelu sterowania zmiennymi decyzyjnymi użytkownik może definiować następujące warunki wejściowe eksperymentu:

- wybór zestawu asortymentowego wyrobów do analizy symulacyjnej,

- wyznaczenie ceny sprzedaży dla poszczególnych wyrobów,
- określenie dostępności surowców zużywanych w procesie produkcji.

Po uruchomieniu eksperymentu na ekranie prezentacji można obserwować kształtowanie się wartości przyjętej funkcji celu.

3. Programowanie produkcji – wyznaczanie struktury asortymentowej

3.1. Sformułowanie problemu

Jednym z istotnych problemów w zarządzaniu przedsiębiorstwem przemysłowym jest zagadnienie wyznaczania właściwej struktury asortymentowej produkcji. Przyjęty program produkcji powinien zapewnić sprzedaż wyprodukowanych wyrobów, przynieść godziwy zysk, a także uwzględniać ograniczony dostęp środków produkcji, w tym materiałów, siły roboczej oraz mocy wytwórczych. Pewien sposób rozwiązania problemu planowania asortymentowego proponuje programowanie liniowe. Polega on na wyznaczeniu takiego programu produkcji (równej w ujęciu ilościowym sprzedaży) poszczególnych wyrobów x_1, x_2, \dots, x_n , dla których funkcja celu

$$z_1x_1 + z_2x_2 + \dots + z_nx_n$$

przyjmie wartość maksymalną przy następujących ograniczeniach:

$$a_{1,1}x_1 + a_{1,2}x_2 + \dots + a_{1,n}x_n \leq b_1,$$

$$a_{2,1}x_1 + a_{2,2}x_2 + \dots + a_{2,n}x_n \leq b_2,$$

.....

$$a_{m,1}x_1 + a_{m,2}x_2 + \dots + a_{m,n}x_n \leq b_m,$$

oraz

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0,$$

gdzie

z_1, z_2, \dots, z_n – jednostkowy zysk ze sprzedaży j -tego wyrobu ($j = 1, 2, \dots, n$),

$a_{i,j}$ – norma zużycia i -tego rodzaju środka produkcji ($i = 1, 2, \dots, m$) na jednostkę j -tego wyrobu, wynikająca z charakteru procesu technologicznego,

b_i – limity wykorzystania środków produkcji ($i = 1, 2, \dots, m$).

Przy tak sformułowanym problemie bada się zysk dla różnych zestawień struktury asortymentowej produkcji (x_1, x_2, \dots, x_n), mając zidentyfikowane normy ($a_{1,1}, a_{1,2}, \dots$,

$a_{m,n}$) i limity (b_1, b_2, \dots, b_m) zużycia środków produkcji. Struktura asortymentowa może być uznana za optymalną, jeżeli jest zbiorem takich wartości x_1, x_2, \dots, x_n , z zakresu wartości dopuszczalnych, przy których funkcja $z_1x_1 + z_2x_2 + \dots + z_nx_n$ przybiera wartość maksymalną.

Poszukiwane rozwiązanie optymalne można znaleźć w wyniku geometrycznej interpretacji programowania liniowego. Podejście to jest dopuszczalne jedynie wówczas, gdy problem decyzyjny jest ograniczony do dwóch zmiennych, podczas gdy dowolnego typu zagadnienie liniowe można badać z użyciem algorytmu simpleks. Idea tego algorytmu sprowadza się do wyboru w pierwszym kroku tzw. rozwiązania bazowego. W kolejnych krokach rozwiązanie bazowe jest stopniowo ulepszane poprzez zmiany wierzchołków wyznaczonych przez zbiór rozwiązań dopuszczalnych (por. Lipiec-Zajchowska [8]).

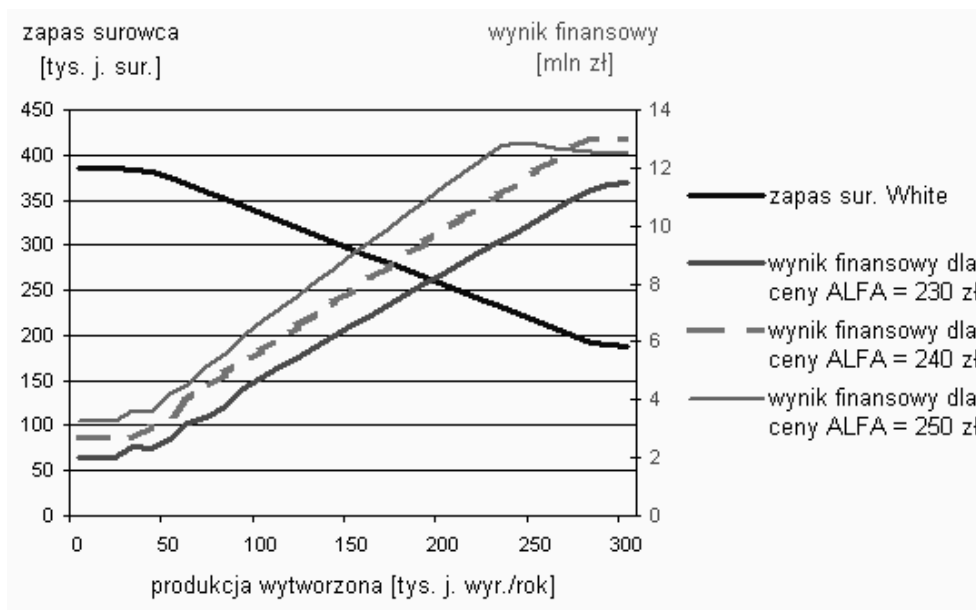
Głównym ograniczeniem metody jest statyczna postać modelu programowania liniowego, a zatem pomijająca czynnik czasu. Rozwiązanie problemu asortymentowego planowania produkcji drogą programowania liniowego ważne jest zatem tylko dla danego punktu czasowego oraz po uwzględnieniu wielu, właściwych dla tej metody, uproszczeń. Zgodnie z nazwą metody (programowanie liniowe), z góry przyjęte jest założenie, że zarówno funkcja celu, jak i relacje między wielkością produkcji a zużyciem środków produkcji są linearne. Ale – jak pisze Nowak – *zależności występujące w praktyce nie zawsze jednak mają charakter liniowy* [7, s. 112] i także stwierdza: *Założenie o proporcjonalności przychodów ze sprzedaży w stosunku do ilości sprzedanych wyrobów może być utrzymane jedynie w analizach krótkookresowych* [7, s. 59]. Dlatego też zaproponowane zostanie podejście symulacyjne.

3.2. Eksperymenty symulacyjne

Cel eksperymentu jest analogiczny jak w klasycznym zadaniu programowaniu liniowego. Poszukuje się takich wielkości produkcji i sprzedaży wyrobów, dla których określona funkcja celu przyjmie wartość maksymalną przy zadanych ograniczeniach. Funkcją celu jest zysk netto, ograniczeniami natomiast – dostępność surowców do produkcji. W trakcie eksperymentów model systemu poddaje się oddziaływaniom zarządczym, zakodowanym w formie zbioru danych wejściowych. W omawianych testach działania te odwzorowywały podstawowe, ale coraz bardziej złożone typy sytuacji decyzyjnych przy wyznaczaniu struktury asortymentowej produkcji, szczególnie układy jedno-, dwu- i trójasortymentowy.

a) **Układ jednoasortymentowy.** Założono, że zarząd przedsiębiorstwa powinien podjąć decyzję o skali wytwarzania pojedynczego asortymentu (wyrób ALFA), co wiąże się ze zużywaniem do tego celu pojedynczego surowca (RED). Poszukiwano takiej wielkości produkcji wyrobu ALFA, aby przy danej cenie sprzedaży oraz okre-

ślonej dostępności surowca RED uzyskać najlepszy zysk. Na podstawie serii eksperymentów symulacyjnych z wykorzystaniem systemu Ek_An_Pro otrzymano (rys. 3) krzywą, która ilustruje kształtowanie się wielkości zysku (skumulowanego w ciągu jednego roku) w zależności od wielkości produkcji i sprzedaży. Z analizy wykresu wynika wniosek, który można uznać za trywialny, że maksymalny zysk uzyskuje się od momentu, w którym poziom produkcji wyrobu ALFA zapewnia pełne wykorzystanie dostępnego surowca RED.

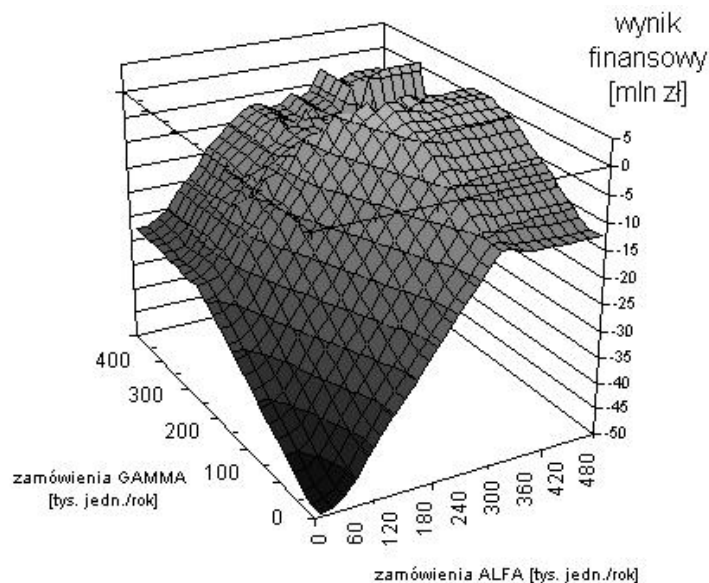


Rys. 3. Wykres zmiennych zależnych: zapasu surowca i wyniku finansowego w funkcji zmiennej niezależnej produkcji wytworzonej oraz wariantów cen wyrobu

b) **Układ dwuasortymentowy.** W eksperymentach założono, że zarząd przedsiębiorstwa powinien podjąć decyzję dotyczącą skali wytwarzania dwu asortymentów (wyrób ALFA i wyrób BETA), używając do tych celów dwa surowce (surowiec RED i surowiec WHITE). Zużycie surowców do produkcji pojedynczej sztuki wyrobów ALFA i BETA jest stałe (nie zależy od skali produkcji), ale normy surowcochłonności wyrobów ALFA i BETA względem surowców RED i WHITE różnią się. Poszukiwano takiej wielkości produkcji wyrobów ALFA i BETA, aby przy założonej cenie ich sprzedaży oraz określonej dostępności surowców RED i WHITE uzyskać największy sumaryczny zysk z działalności produkcyjnej firmy. W tym przypadku szukane rozwiązanie nie jest trywialne, czyli nie jest do przewidzenia bezpośrednio drogą spekulacji myślowych. Nie jest również możliwe znalezienie poszukiwanego rozwiązania w sposób analityczny ze względu na dynamiczny charakter relacji między

decyzją o uruchomieniu produkcji, a końcowym efektem ekonomicznym czyli uzyskaniem zysku. Aby znaleźć poszukiwane rozwiązanie posłużono się metodą symulacji dynamicznej z wykorzystaniem systemu Ek_An_Pro.

Eksperymenty prowadzono metodą symulacji inkrementacyjnej. Jako zmienną niezależną przyjęto, zgodnie z zadaniem programowania produkcji, zamówienia na produkcję wyrobów ALFA i BETA. Przy stałej wielkości zamówienia na wyrób BETA, zmieniano sukcesywnie, w każdym kolejnym eksperymencie symulacyjnym, wielkość zamówień na wyrób ALFA o 10 jednostek w przyjętym zakresie zmienności. Po wyczerpaniu zakresu zmienności serię eksperymentów powtarzano, przy zmianie wielkości zamówienia na wyrób BETA o 10 jednostek. We wszystkich eksperymentach zmienną obserwowaną był skumulowany zysk netto z sumarycznej wartości sprzedaży wyrobów ALFA i BETA. W rezultacie eksperymentów otrzymano dwuwymiarową przestrzeń wyników (rys. 4). Analiza tej przestrzeni pozwala na wskazanie punktu X , spełniającego przyjęte kryterium. W punkcie X struktura asortymentowa produkcji wyrobów ALFA i BETA zapewnia maksymalny zysk netto, a zatem jest rozwiązaniem sformułowanego na wstępie zadania programowania produkcji.



Rys. 4. Wykres powierzchniowy wyniku finansowego w funkcji zamówień produkcyjnych wyrobów

c) **Układ trójsortymentowy.** Założono, że przedsiębiorstwo wytwarza trzy asortymenty (wyrób ALFA, BETA, GAMMA), używając do tych celów trzy surowce (surowiec RED, WHITE, BLUE). Podobnie jak w przypadku b) normy surowcochłonności dla poszczególnych wyrobów i używanych w procesie ich wytwarzania surowców są różne. Dla układu trójsortymentowego rozwiązanie trywialne zagad-

nienia programowania produkcji nie istnieje. Poszukiwanie rozwiązania metodą symulacji inkrementacyjnej nie będzie miało praktycznego znaczenia, gdyż jest bardzo czasochłonne, jeszcze bardziej niż w przypadku b).

Przy znacznej złożoności sytuacji początkowej (duża liczba wyrobów i surowców, szeroki zakres zmienności możliwych poziomów produkcyjnych) inkrementacyjna metoda symulacyjna nie nadaje się zbytnio do poszukiwania punktu optymalnego dla zagadnienia programowania produkcji. Za jej pomocą nie można zatem w sposób efektywny znaleźć takiej kombinacji poziomów produkcji dla poszczególnych wyrobów, który przy danej dostępności surowców zapewniałby największy zysk. Należy pamiętać, że przy m zmiennych, z których każda może przybrać n możliwych wartości, pełny plan symulacji obejmuje n^m przebiegów. W omawianym przypadku, zakładając jak w przypadku b), że dla każdego produktu badamy 20 odmiennych poziomów produkcji, liczba przebiegów symulacyjnych wynosi 20^3 czyli 8000. Jest to zatem podejście mało perspektywiczne, nawet przy uwzględnieniu założenia o nieustannym wzroście szybkości komputerów.

Tabela 1

Przykład wyników analizy scenariuszowej „what-if”,
w której zmienną decyzyjną są zamówienia surowców

Rok	2004	2005	2006
Wyrób	Produkcja wytworzona [tys. jedn. wyr. / rok]		
ALFA	290	260	240
BETA	249	261	238
GAMMA	280	271	232
Surowiec	Zamówienia surowców [tys. jedn. sur. / rok]		
White	205	260	230
Black	180	275	210
Red	200	245	230
Wyniki finansowe [mln zł]			
Sprzedaż	275,9	280,7	261,7
Koszty	251,1	238,0	220,7
Zysk	24,8	42,7	41,0

Z tej beznadziejnej (pozornie) sytuacji istnieją jednak trzy alternatywne wyjścia: symulacyjna metoda scenariuszowa, techniki planowania eksperymentu symulacyjnego [2] oraz optymalizacja wyników symulacji poprzez wykorzystanie informacji o tzw. powierzchniach odpowiedzi (ang. *response surfaces*) lub metamodeli (zintegrowanie modelu symulacyjnego z np. algorytmami genetycznymi) [1]. W niniejszej pracy skupiono się na symulacyjnej metodzie scenariuszowej, zwanej też analizą „what-if”. W tego typu podejściu poszukiwania eksperymentalne ograniczają się do znalezienia

odpowiedzi na pytanie: jaki (WHAT) będzie zysk, jeżeli (IF) ustalimy pewne poziomy produkcji przy założonej dostępności zasobów? Należy podkreślić, że gdy w analizie struktury asortymentowej produkcji zrezygnujemy z poszukiwań punktu optymalnego na rzecz analizy scenariuszowej, wówczas zakres eksperymentalnych badań symulacyjnych radykalnie się poszerza. Możemy na przykład istotnie zwiększyć liczbę badanych wyrobów i surowców, jak również wprowadzić ograniczenia ze strony innych czynników produkcji, jak moce wytwórcze czy dostępność siły roboczej. Można również przyjąć tak oczywiste założenie, że produkcja nie równa się sprzedaży, a zatem że istnieją ograniczenia ze strony rynku modelowane przez funkcję popytu.

Za pomocą systemu Ek_An_Pro przeprowadzono eksperyment scenariuszowy dla układu trójassortymentowego, w którym założono, że popyt na wyroby jest ograniczony liniową funkcją popytu. Wyniki tych eksperymentów zawiera tabela 1.

4. Programowanie produkcji – wyznaczanie progu rentowności

Jednym z istotnych zagadnień w programowaniu produkcji jest wyznaczenie wielkości produkcji, przy której sprzedaż danego wyrobu zaczyna przynosić zyski. Zagadnienie to jest nazywane analizą progu rentowności lub poszukiwaniem tzw. punktu przełamania BEP (*Break-Even Point*). Punkt przełamania może być przy tym wyznaczony w sposób ilościowy (ilość sprzedawanego wyrobu) bądź wartościowy (wartość sprzedaży). Dla produkcji jednoasortymentowej próg rentowności w ujęciu wartościowym można wyliczyć ze wzoru

$$S = \frac{k_s}{p - k_z},$$

gdzie:

- k_s – koszty stałe operacyjne,
- p – cena jednostkowa,
- k_z – koszty zmienne jednostkowe.

Tego typu metoda wyznaczania progu rentowności opiera się na następujących założeniach [5]:

- wszystkie czynniki wpływające na rentowność poza rozpatrywanymi są traktowane jako stałe,
- rozważa się tylko jeden asortyment wyrobów,
- wartość produkcji równa się wartości sprzedaży,
- koszty całkowite oraz przychody całkowite są liniowymi funkcjami produkcji,
- można dokonać podziału kosztów całkowitych na dwie grupy: koszty zmienne i koszty stałe,

- koszty zmienne zmieniają się proporcjonalnie do wahań wielkości produkcji,
- cena wyrobu nie ulega zmianie z upływem czasu i zmianami skali produkcji,
- poziomy jednostkowych cen sprzedaży oraz zmiennych i stałych kosztów operacyjnych pozostają niezmiennie.

Poczynione założenia w sposób znaczący obniżają użyteczność klasycznej metoda wyznaczania progu rentowności, gdyż wiele z tych ograniczeń należy uznać za nierealistyczne. Przykładem są tezy o zerowej elastyczności cenowej popytu lub że wartość produkcji równa się wartości sprzedaży. Przyjmuje się przy tym, w sposób niejawnym, pełną dostępność środków produkcji, niezależnie od wielkości złożonych zamówień produkcyjnych. Należy zaznaczyć, że klasyczna analiza progu rentowności jest de facto analizą statyczną. Ujmowane w niej wielkości ekonomiczne są wartościami bilansowymi, naliczanymi na koniec roku obrachunkowego. Analiza dostarcza zatem jedynie informacji, czy sumaryczny wynik finansowy ze sprzedaży wytworzonej produkcji, na przykład w danym roku, jest dodatni. Nie wiemy natomiast, czy w poszczególnych okresach częściowych, to znaczy w kolejnych miesiącach lub kwartałach, produkcja była rentowna.

Aby choć po części rozszerzyć możliwości analityczne klasycznej metody wyznaczania punktu przełamania, zaproponowano wykorzystanie do tego celu technik symulacyjnych. Oczekuje się, że dzięki zastosowaniu symulacji komputerowej przynajmniej niektóre założenia, krępujące klasyczną analizę progu rentowności, będą mogły zostać uchylone.

4.1. Symulacyjne wyznaczanie progu rentowności

Założenia

Analogicznie jak w klasycznej metodzie analizy progu rentowności celem eksperymentu jest wyznaczenia takiego punktu na krzywej „wielkość sprzedaży – przychody ze sprzedaży”, przy którym wpływy ze sprzedaży w pełni pokrywają koszty wytwarzania.

Eksperyment

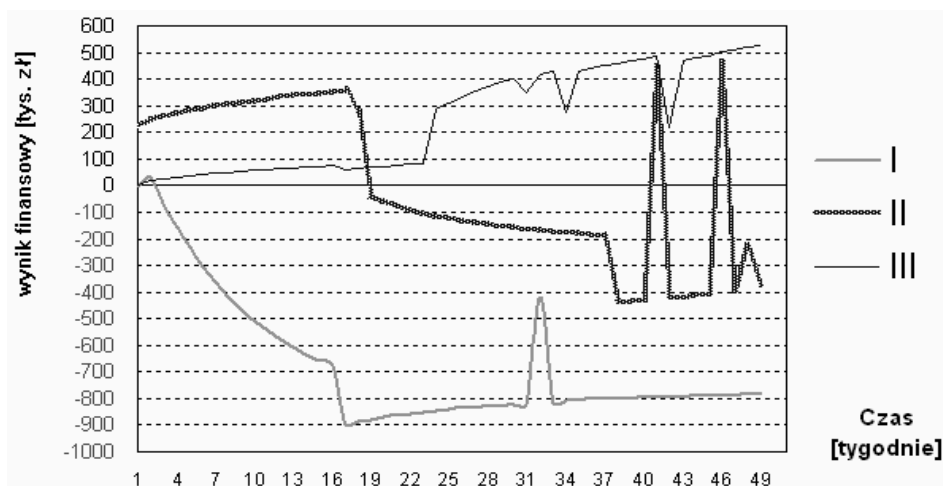
Za pomocą systemu Ek_An_Pro przeprowadzono eksperyment, mający na celu symulacyjne wyznaczenie punktu przełamania. Tym razem wykorzystano moduł interpretatora języka sterowania eksperymentem w badaniu wrażliwości wyniku finansowego na zmiany wielkości zamówień produkcyjnych wyrobu Alfa, jednocześnie wyznaczając próg rentowności. Okres symulacji wynosił 1 rok. W efekcie otrzymano zbiór charakterystyk dynamicznych, opisujących kształtowanie się zmiennej obserwowanej, czyli rentowności.

Należy podkreślić, że dzięki serii eksperymentów można było, dla danych warunków ekonomicznych, wyznaczyć trzy typy punktów przełamania (rys. 5):

I punkt przełamania, odpowiadający takiej wielkości zamówienia, przy której choć w jednym tygodniu produkcja okazywała się rentowna,

II punkt przełamania, dla takiej wielkości zamówienia, przy której skumulowany roczny wynik finansowy był dodatni,

III punkt przełamania, odpowiadający takiej wielkości zamówienia, przy której w każdym obserwowanym tygodniu produkcja okazywała się rentowna.



Rys. 5. Obserwowane trajektorie tygodniowego wyniku finansowego, spełniającego warunki poszczególnych punktów przełamania

Poszczególne trajektorie otrzymano dla następujących parametrów:

I Cena jednostkowa Alfa: 160 zł; zamówienie produkcyjne Alfa: 260 tys. j. wyr./rok oraz brak nowych zamówień produkcyjnych na pozostałe wyroby

II Cena jednostkowa Alfa: 250 zł; zamówienie produkcyjne Alfa: 256 tys. j. wyr./rok oraz zamówienia produkcyjne na pozostałe wyroby rzędu 100 tys. j. wyr./rok

III Cena jednostkowa Alfa: 198 zł; zamówienie produkcyjne: 20 tys. j. wyr./rok oraz zamówienia produkcyjne na pozostałe wyroby rzędu 230 tys. j. wyr./rok

Na podstawie wykonanych eksperymentów i obserwowanych trajektorii można postawić tezę, że produkcja ograniczona wyłącznie do jednego wyrobu nie jest w stanie zapewnić zadowalającej rentowności, która charakteryzuje się występowaniem III punktu przełamania (dla symulacji trwającej 1 rok).

5. Programowanie rozwoju mocy produkcyjnych – analiza inwestycji

Przedsiębiorstwo musi inwestować w swoje środki trwałe, aby nastąpiła reprodukcja majątku produkcyjnego. Jeżeli firma nie odnawia swojego potencjału wytwórczego

go, to następuje nieuchronny spadek zdolności produkcyjnych, zmniejsza się sprzedaż, firma zanika jako organizacja wytwórcza. Wszelkie decyzje inwestycyjne powinny być podejmowane z dużą rozwagą, po dokonaniu szczegółowych analiz ekonomicznych. Rozpoczęta inwestycja to zamrożenie znacznych środków finansowych na długi okres, liczony w latach. Jakie będą skutki realizacji inwestycji dla sytuacji ekonomiczno-finansowej przedsiębiorstwa, przy jakiej cenie należy sprzedawać wyroby z nowej linii produkcyjnej, aby zostały one zaakceptowane przez rynek, a jednocześnie zapewniły odpowiednią rentowność? – to są pytania, na które powinni znaleźć odpowiedź analitycy, którzy są odpowiedzialni za prawidłowe przygotowanie zasad finansowania dla planowanego projektu inwestycyjnego. W sytuacji dużego zaangażowania inwestycyjnego dla przedsiębiorstwa staje się ważny rachunek przepływów pieniężnych, zwłaszcza oszacowanie spodziewanej nadwyżki pieniężnej. Kierownictwo firmy powinno wiedzieć, czy konieczność płacenia faktur za roboty budowlano-montażowe nie zagrozi płynności finansowej, czy nie należy być przygotowanym na konieczność sięgnięcia po zewnętrzne źródła pieniądza, tj. po kredyty bankowe, emisję papierów wartościowych. Ponieważ w momencie zakończenia budowy warunki gospodarowania mogą ulec istotnym zmianom, analityk musi przeprowadzić szacunki popytu na wyroby firmy, określić cenę, przy jakiej będzie można sprzedać zwiększony wolumen produkcji, wyliczyć wielkość sprzedaży, która zapewni zwrot nakładów poniesionych na inwestycję. Analiza opłacalności projektu inwestycyjnego ma charakter zdecydowanie prognostyczny, powinna być zatem przygotowywana wariantowo, przy założeniu różnych scenariuszy zmian najważniejszych parametrów ekonomiczno-finansowych, w tym: ceny sprzedaży, skali popytu, poziomu aktywności produkcyjnej.

W kontekście sformułowanych powyżej pytań i problemów staje się oczywiste, że zagadnienie badania efektywności inwestycji jest jedną z najbardziej skomplikowanych kwestii analizy ekonomicznej. Do standardowych metod analizy projektów inwestycyjnych należą wyliczenia: średniej stopy zwrotu, wartości bieżącej netto, wewnętrznej stopy zwrotu, wskaźnika zyskowności, zdyskontowanego okresu zwrotu [6]. Zakres analityczny tych metod jest bardzo ograniczony. Najczęściej analiza projektu polega na wzajemnym porównywaniu strumieni pieniężnych odpowiadających wydatkom poniesionym na realizację danej inwestycji z dochodami pieniężnymi uzyskanymi dzięki tej inwestycji. Wpływ czynnika czasu jest bądź całkowicie pomijany, bądź, jak w przypadku metod dyskontowych, uwzględniany wyłącznie w kontekście wpływu procesów inflacyjnych na zmianę wartości pieniądza.

Podobnie jak w przypadku poszukiwania prognozy rentowności czy harmonogramowania produkcji w tym artykule proponujemy metodę symulacyjną jako sposób oceny efektywności projektów inwestycyjnych. Dysponując poprawnie zweryfikowanym modelem symulacyjnym, można ocenić wpływ realizacji inwestycji na sytuację ekonomiczną przedsiębiorstwa z uwzględnieniem skutków krótko- i długoterminowych. Scenariuszowe eksperymenty symulacyjne powinny dostarczyć odpowiedzi na pyta-

nia: czy przedsiębiorstwo będzie w stanie pokryć wydatki z tytułu finansowania inwestycji, czy produkcja z nowej inwestycji zostanie sprzedana, jak się zmieni zysk netto i nadwyżka pieniężna firmy?

Z wykorzystaniem systemu Ek_An_Pro przeprowadzono serie eksperymentów symulacyjnych. Wyposażony w komputerowy model przedsiębiorstwa (uwzględniający możliwość prowadzenia działalności inwestycyjnej dotyczącej środków produkcji) system Ek_An_Pro umożliwia scenariuszową analizę efektywności przedsięwzięcia inwestycyjnego z uwzględnieniem całej złożoności relacji zachodzących pomiędzy realizowaną inwestycją a działalnością produkcyjną, marketingową i finansową przedsiębiorstwa. Model symulacyjny pozwala przede wszystkim na dynamiczną ocenę poprawności decyzji o uruchomieniu procesu inwestycyjnego w aspekcie wpływu tej decyzji na osiągnięcie strategicznych celów firmy tak w ujęciu krótko-, jak i długookresowych. Poniżej zaprezentowano wyniki eksperymentów symulacyjnych, których celem było znalezienie odpowiedzi na pytania:

- Jak realizacja inwestycji wpływa na kształtowanie się podstawowych kategorii ekonomicznych firmy?
- Jaka powinna być właściwa cena sprzedaży dla wyrobów pochodzących z nowej inwestycji?

W każdym eksperymencie badano efektywność realizacji projektu inwestycyjnego o umownej nazwie WROC1, charakteryzującego się następującymi parametrami ekonomicznymi:

- koszt inwestycji 10 mln zł,
- czas realizacji 2 lata,
- planowana zdolność wytwórcza 100 tys. jedn. wyrobu/rok.
- źródłem finansowania są fundusze własne firmy.

5.1. Wpływ realizacji inwestycji na sytuację ekonomiczną przedsiębiorstwa

Celem eksperymentów (tab. 2) było oszacowanie, metodą symulacji komputerowej z wykorzystaniem interaktywnego interfejsu użytkownika, wpływu realizacji inwestycji WROC1 na dynamiczne kształtowanie się podstawowych charakterystyk ekonomiczno-finansowych przedsiębiorstwa. Z wykorzystaniem symulatora Ek_An_Pro przeprowadzono trzy eksperymenty symulacyjne (A1, A2, A3) przy następujących założeniach:

Wariant A1. Przedsiębiorstwo nie prowadzi działalności inwestycyjnej, co skutkuje stopniowym obniżaniem się zdolności produkcyjnych.

Wariant A2. W celu zwiększenia zdolności produkcyjnych przedsiębiorstwo podjęło i zrealizowało inwestycję WROC 1. Poziom aktywności produkcyjnej pozostał na takim samym poziomie jak w eksperymencie A1.

Wariant A3. W celu zwiększenia zdolności produkcyjnych przedsiębiorstwo podjęło i zrealizowało inwestycję WROC 1. Poziom aktywności produkcyjnej dostosowano do skali nowo uzyskanych, w wyniku realizacji inwestycji WROC1, możliwości wytwórczych.

Tabela 2

Wpływ realizacji inwestycji na sytuację ekonomiczną przedsiębiorstwa

Wariant	2004 r.	2005 r.	2006 r.
Zysk netto [mln zł]			
A1	15,4	12,6	20,1
A2	15,4	10,4	17,3
A3	15,4	14,1	21,5
Nadwyżka pieniężna [mln zł]			
A1	32,6	24,7	28,4
A2	32,6	23,5	27,3
A3	32,6	25,3	31,5
Zdolności produkcyjne [tys. jedn./rok] – stan na 1 stycznia			
A1	300	270	243
A2	300	370	335
A3	300	370	335
Produkcja wytworzona [tys. jedn./rok]			
A1	282	260	230
A2	282	270	230
A3	282	333	300
Produkcja sprzedana [tys. jedn./rok]			
A1	357	265	230
A2	357	275	230
A3	357	337	300
Wykorzystanie zdolności produkcyjnych [%]			
A1	100	100	100
A2	100	77,2	72,7
A3	100	95,3	95,7

Symulacje pozwoliły określić wpływ przyjętych wariantów decyzyjnych na kształtowanie się wielkości ekonomiczno-finansowych dla symulowanego przedsiębiorstwa w okresie trzyletnim (lata 2004, 2005, 2006). Wartości liczbowe są wielkościami skumulowanymi dla lat 2004–2006. Analiza wyników eksperymentów (tab. 2) potwierdza, że symulowane przedsiębiorstwo zachowuje się zgodnie ze zdroworozsądkowymi regułami gospodarczymi. Najlepsze wyniki uzyskano dla wariantu A3 (zysk netto – 51 mln zł, nadwyżka pieniężna – 88,4 mln zł), gorsze dla A1 (zysk netto – 48,1 mln zł, nadwyżka pieniężna – 85,7 mln zł), najgorsze dla A2 (zysk netto – 43,1 mln zł, nadwyżka pieniężna – 83,4 mln zł). Złe wyniki ekonomiczno-finansowe pojawiły się zatem wówczas, gdy przedsiębiorstwo poniosło nakłady na inwestycję, ale

wysiłku tego nie zdyskontowało poprzez odpowiednie zwiększenie aktywności produkcyjnej (wariantu A2). Są to oczywiste konsekwencje ponoszenia kosztów związanych z utrzymywaniem majątku produkcyjnego w stanie beczynnym. Lepsze wyniki, w stosunku do wariantu A2, firma osiąga zatem wtedy, gdy nie decyduje się na inwestycje, wówczas przedsiębiorstwo ma co prawda mniejsze moce wytwórcze, ale za to w pełni je wykorzystuje (wariant A1). Najlepsze wyniki, i to też jest oczywiste, uzyskano dla wariantu A3 w którym firma zwiększyła, poprzez realizację inwestycji WROC1, swoje moce wytwórcze, ale także wzrosła wyraźnie sprzedaż, gdyż firma dostosowała swoją aktywność produkcyjną do nowych możliwości wytwórczych.

5.2. Wyznaczanie ceny sprzedaży wyrobów

W tej serii eksperymentów poszukiwano, za pomocą symulacji komputerowej, ceny sprzedaży (tab. 3), która zapewni zyskowne zbycie produkcji w warunkach wzrostu mocy wytwórczych firmy. Wzrost potencjału produkcyjnego przedsiębiorstwa wynika z oddania do eksploatacji inwestycji WROC1. Przyjęto przy tym, że popyt na wyroby firmy jest ograniczony liniową funkcją popytu, gdzie cena sprzedaży jest zmienną niezależną. Dylemat decyzyjny polega na próbie znalezienia odpowiedzi na pytanie, która z dwóch opisanych poniżej strategii postępowania jest bardziej korzystna dla przedsiębiorstwa, przy przyjęciu zysku netto jako kryterium efektywności działania.

Strategia I – przedsiębiorstwo ustala niską cenę sprzedaży wyrobu zadowalając się niską marżą zysku jednostkowego. W takiej sytuacji niska cena sprzedaży pozwala na zwiększenie popytu, a tym samym zwiększenie wolumenu sprzedaży i w konsekwencji pełne wykorzystanie nowych, powstałych w wyniku realizacji inwestycji WROC1, mocy wytwórczych.

Strategia II – przedsiębiorstwo ustala wysoką cenę sprzedaży uzyskując tym samym wysoką marżę zysku jednostkowego. W tym przypadku wysoka cena sprzedaży ograniczy popyt, zmniejszy możliwy wolumen sprzedaży, a tym samym nie pozwoli na wykorzystanie nowo uzyskanych mocy wytwórczych.

Aby ustalić wpływ ceny sprzedaży na wyniki ekonomiczno-finansowe firmy, przebadano trzy warianty decyzyjne B1, B2, B3. W kolejnych eksperymentach przyjęto następujące założenia szczegółowe dotyczące zmienianych parametrów:

Wariant B1 (strategia I). Cena sprzedaży przyjęta na poziomie niskim, aktywność produkcyjną ustalono na poziomie zapewniającym pełne wykorzystanie nowo pozyskanych mocy wytwórczych.

Wariant B2 (strategia II). Cena sprzedaży przyjęta na poziomie wysokim, aktywność produkcyjną ustalono na poziomie zapewniającym pełne wykorzystanie nowo pozyskanych mocy wytwórczych.

Wariant B3 (strategia II). Cena sprzedaży przyjęta na poziomie wysokim, aktywność produkcyjną ustalono na poziomie odpowiadającemu zredukowanemu popytowi na wyroby firmy.

Analogicznie jak w badaniu wpływu inwestycji na charakterystyki ekonomiczno-finansowe firmy, przeprowadzone eksperymenty potwierdzają, że symulator Ek_An_Pro w sposób racjonalny odwzorowuje reakcje przedsiębiorstwa poddanego alternatywnym procedurom decyzyjnym (tab. 3). Najlepsze wyniki uzyskano dla wariantu B1 (zysk netto – 14,1 mln zł (wartości liczbowe odpowiadają wynikom przedsiębiorstwa w pierwszym roku po oddaniu inwestycji WROC1 do eksploatacji, czyli w roku 2005), nadwyżka pieniężna – 25,2 mln zł). W wariantcie tym przyjęto niską cenę sprzedaży (240 zł/jedn. wyrobu). Przy tej cenie popyt na wyroby firmy pozwala na pełne wykorzystanie nowo pozyskanych, poprzez oddanie do eksploatacji inwestycji WROC1, mocy wytwórczych. Najgorsze wyniki (zysk netto – 10,4 mln zł, nadwyżka pieniężna – 12,2 mln zł) odnotowano dla wariantu B2, w którym ustalono wysoką cenę sprzedaży (270 zł/jedn. wyrobu). Założono przy tym, w sposób oczywiście błędny, że popyt na wyroby firmy utrzyma się na takim samym poziomie, jak w wariantcie B1. Brak redukcji zamówień produkcyjnych spowodował odłożenie się znacznych zapasów wyrobów gotowych, co ujemnie zaważyło na wynikach ekonomiczno-finansowych firmy. Zapasy te dla wariantu B1 wyniosły 6,7 tys. jedn., natomiast w wariantcie B2 wzrosły aż do wielkości 113,3 tys. jedn.

Tabela 3

Wyznaczanie ceny sprzedaży wyrobów

Wariant B1	Wariant B2	Wariant B3
Cena sprzedaży [zł/jedn. wyrobu]		
240	270	270
Zysk netto [mln zł]		
14,1	10,4	11,3
Nadwyżka pieniężna [mln zł]		
25,2	12,2	25,1
Zdolności produkcyjne [tys. jedn./rok] – stan na 1 stycznia		
370	370	370
Produkcja wytworzona [tys. jedn./rok]		
333	333	231
Produkcja sprzedana [tys. jedn./rok]		
337	231	231
Zapasy wyrobów gotowych [tys. jedn./rok]		
6,7	113,3	14,5
Stopień wykorzystania zdolności produkcyjnych [%]		
100	95,4	67,2

Dla wariantu B3 uzyskane wyniki ekonomiczno-finansowe (zysk netto – 11,3 mln zł, nadwyżka pieniężna – 25,1 mln zł) są nieco gorsze w porównaniu z wariantem B1.

W wariancie B3 ustalono wysoką cenę sprzedaży, analogicznie jak w wariancie B2. Spodziewając się jednak obniżenia popytu na wyroby dokonano jednocześnie obniżenia zamówień produkcyjnych, jak również zamówień na surowce do produkcji. W efekcie nie nastąpiło odłożenie się zapasów wyrobów gotowych (na koniec roku wynosiły one 14,5 tys. jedn.), a wyższa marża jednostkowa zrekompensowała utratę wpływów spowodowaną redukcją wolumenu sprzedaży.

Podsumowanie

Przytoczone wyniki badań eksperymentalnych ukazują możliwości symulacji komputerowej jako metody analizy problemów związanych z programowaniem produkcji. Symulacja pozwala na studiowanie zagadnień o wysokim stopniu złożoności, a zatem na analizowanie problemów decyzyjnych będących poza zasięgiem klasycznych metod analitycznych. Decydując się jednak na porzucenie metod badań operacyjnych na rzecz symulacji komputerowej należy mieć świadomość, że symulacja jest skutecznym narzędziem badawczym jedynie przy spełnieniu pewnych warunków. Kluczowym warunkiem jest stosowanie w badaniach eksperymentalnych jedynie pozytywnie zweryfikowanych modeli symulacyjnych. Zagadnienie weryfikacji symulatorów komputerowych należy do podstawowych, do dziś nie w pełni wyjaśnionych problemów metodologicznych badań symulacyjnych. Symulator Ek_An_Pro poddano serii testów [10] stanowiących kompleksową procedurę weryfikacji opartą na metodzie bilansowej (model przedsiębiorstwa) oraz hipotetyczno-dedukcyjnej (na etapie sterowania eksperymentem i analizy wyników). Pomyślny wynik tych testów stanowił warunek konieczny (aczkolwiek niewystarczający), aby uznać symulator za narzędzie badawcze w analizie problemów występujących przy programowaniu produkcji w przedsiębiorstwach przemysłowych. Zwrócono uwagę na dobór trybów symulacji, takich jak symulacja inkrementacyjna, wykorzystująca graficzny (uniwersalny albo dostosowany do warunków zadania) interfejs użytkownika, a także kontrolowanie przebiegu eksperymentu za pośrednictwem interpretownego języka (w module sterowania eksperymentem).

Bibliografia

- [1] APRIL J., *Practical Introduction to Simulation Optimization*, Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference.
- [2] KELTON W.D., BARTON R.R., *Experimental Design for Simulation*, Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference.
- [3] KRUPOWICZ A., *Metody numeryczne zagadnień początkowych równań różniczkowych zwyczajnych*, PWN, Warszawa 1986.

- [4] MARTAN L., *Rachunek efektywności rzeczowych przedsięwzięć inwestycyjnych*, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2002.
- [5] NAHOTKO S., *Analiza i decyzje finansowe w przedsiębiorstwie*, TNOiK Bydgoszcz, Bydgoszcz 1998.
- [6] NOWAK E., *Teoria kosztów w zarządzaniu przedsiębiorstwem*, PWN, Warszawa 1996.
- [7] NOWAK E., *Zaawansowana rachunkowość zarządcza*, PWE, Warszawa 2003.
- [8] LIPIEC-ZAJCHOWSKA M., *Wspomaganie procesów decyzyjnych*, Wyd. C.H. Beck, Warszawa 2003.
- [9] PECHE T., *Metody bilansowania w rachunkowości, a systemy informacyjne w gospodarce narodowej*, PWN, Warszawa 1991.
- [10] RADOSIŃSKI E., *Systemy informatyczne w dynamicznej analizie decyzyjnej*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa–Wrocław 2001.
- [11] RADZIKOWSKI W., *Matematyczne techniki zarządzania*, PWE, Warszawa 1980.

Simulation methods for production programming

The main body of the paper is devoting to reporting an investigation designed to solve selected problems of production programming with a help of a computer simulation. The Ek_An_ – computer experimental environment with a DEF company simulation model incorporated was used as a main exploratory tool. The special version of Ek_An_ environment's interface, i.e. Ek_An_Pro was designed to improve carrying out tests in form of incremental simulation and "what-if" scenario. In particular simulation was applied to calculate: suitable assortment structure of production, break-even point, prices of products and to select a way for investment financing. The dynamic relations between production orders, raw material orders, prices of products and resulted values of goal function (net profit) were investigated in details. The obtained results were presented in form of tabular statements and multidimensional charts. In the final conclusions it was suggested that the properly designed simulation experiments make it possible to determine a set of decision variables that led to satisfactory values of a goal function.

Keywords: *production programming, operational research, simulation, decision support system, design of experiment, break-even analysis*