Jacek Kowalewski

SYMULACYJNY MODEL FABRYKI DYWANÓW

W warunkach coraz ostrzejszej konkurencji menedżerowie kierujący przedsiębiorstwami muszą podejmować coraz bardziej złożone decyzje, które przesądzają nie tylko o sukcesie firm, ale także o ich przetrwaniu. Ważkie decyzje związane są z różnymi sferami działalności: produkcyjną, handlową, finansową, kadrową, i są ze sobą wzajemnie powiązane, tworząc złożoną sieć wzajemnych zależności. Narzędziem, które pozwala na kompleksowe przedstawienie tych powiązań, jest model symulacyjny.

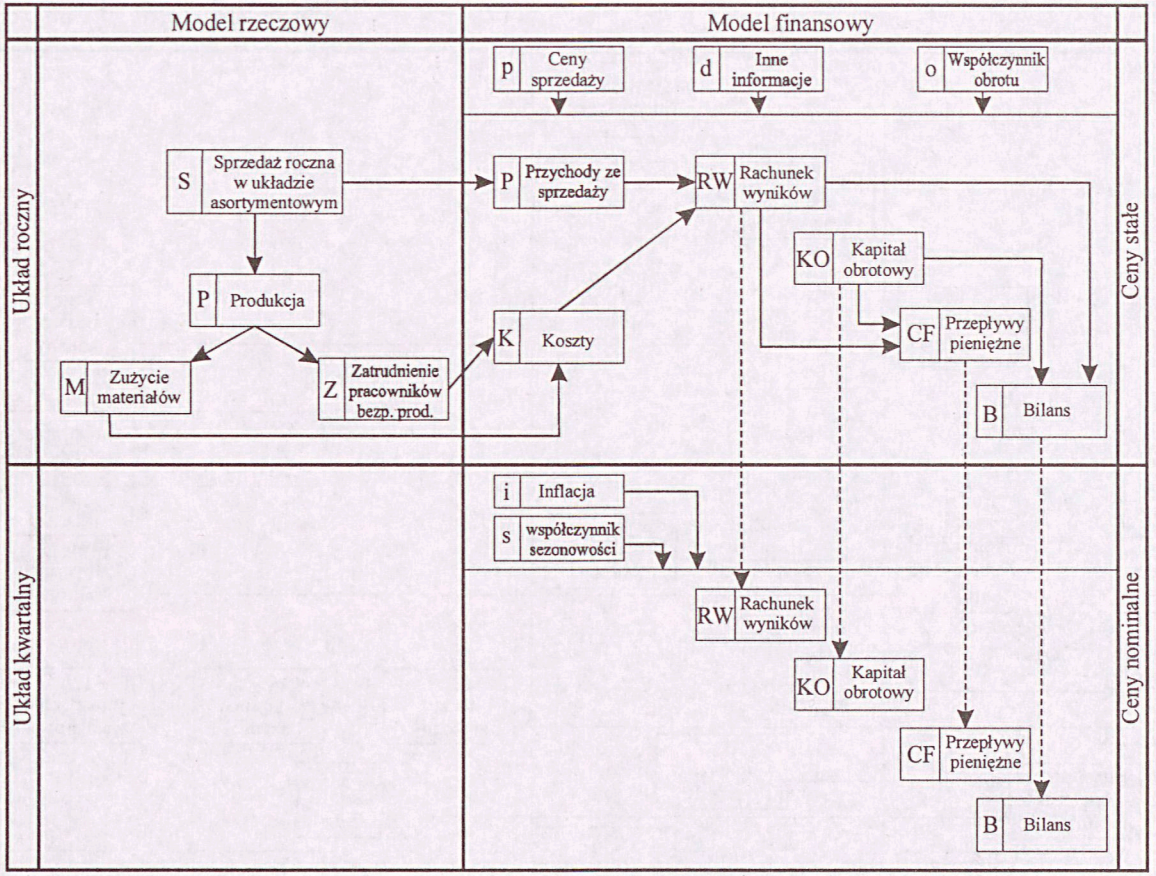
Celem konstrukcji prezentowanego modelu jest próba możliwie całościowego uwzględnienia procesów zachodzących w przedsiębiorstwie produkcyjnym, jakim jest fabryka dywanów, i w jego otoczeniu oraz ocena ich wpływu na sytuację finansową przedsiębiorstwa. Powstanie modelu było możliwe dzięki udostępnieniu szczegółowych danych przez pewną fabrykę dywanów. W toku prac nad modelem wykorzystano procedury związane z analizą statystyczną, ekonometrią oraz programowaniem liniowym. Przedstawiany model ma charakter deterministyczny i opisuje kształtowanie się poszczególnych wielkości zasadniczo w układzie rocznym, z możliwością szczegółowego rozbicia w układzie kwartalnym i miesięcznym.

1. Konstrukcja modelu

W konstrukcji modelu można wyróżnić trzy kolejne etapy (rys.1):

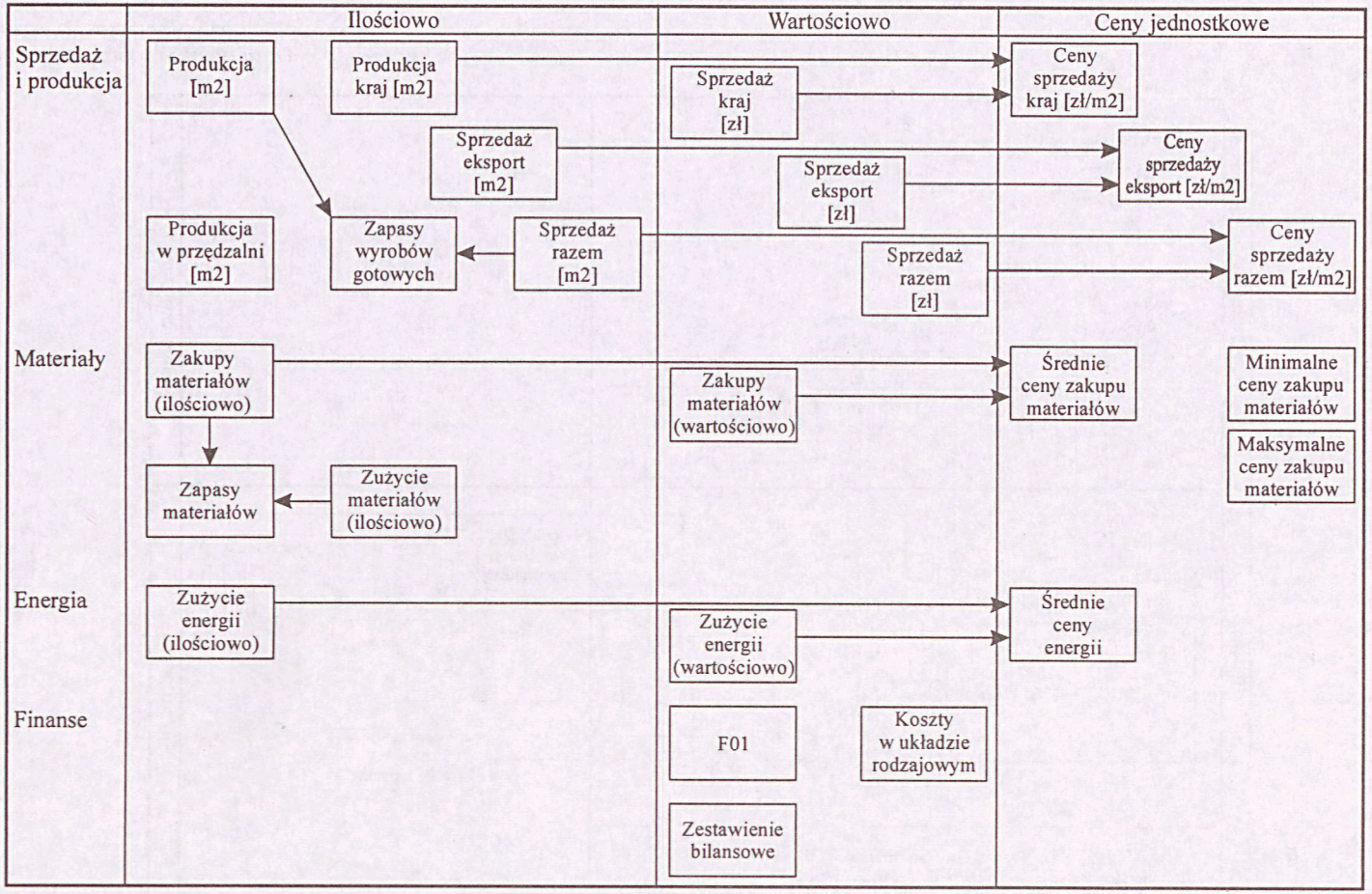
1. *Model rzeczowy* – opisuje wyodrębnione strumienie rzeczowe występujące w fabryce w układzie rocznym.
2. *Model finansowy w cenach stałych* – powstaje na bazie modelu rzeczowego. Rezultatem jego zastosowania jest szacunek przepływów pieniężnych, rachunku zysków i strat, zestawienia bilansowego w cenach realnych, które wynikają z przyjętych założeń związanych z polityką inwestycyjną, sposobem finansowania oraz założeniami związanymi z wielkością realizowanej sprzedaży.
3. *Model finansowy w cenach nominalnych* – uzyskiwany przez nałożenie efektów inflacyjnych i wahań kursowych na model w cenach stałych.

W prezentowanym opracowaniu, szczegółowo omówiona jest część obejmująca model rzeczowy. Pozostałe rozwinięcia modelu, ze względów technicznych, są omówione jedynie w ogólny sposób.



Rys. 1. Schemat modelu fabryki dywanów

•ródło: opracowanie własne



Rys. 2. Struktura bazy danych o fabryce

•ródło: opracowanie własne

Budowa modelu była możliwa dzięki uzyskaniu z fabryki szczegółowych danych związanych ze strumieniami: rzeczowymi (struktura sprzedaży w tys. m^2, ilościowe zużycie materiałów i energii), strumieniami finansowymi (wartość sprzedaży, elementy rachunku zysków i strat) oraz stanami (bilanse). Miały one postać szeregów czasowych z okresu 3 lat w układzie miesięcznym (rys. 2).

2. Model rzeczowy

Punktem wyjścia do opisu strumieni rzeczowych była struktura organizacyjna fabryki, w której wyodrębniono trzy wydziały (tkalni, wykańczalni, przędzalni), które były odrębnie modelowane (rys. 4). Danymi sterującymi omawianego modelu są: zakładana sprzedaż roczna w układzie asortymentowym oraz założenia dotyczące parku maszynowego (zakupy i wycofywanie maszyn) uzupełniane stosownymi współczynnikami technologicznymi, które mają charakter zmiennych parametrycznych. W celu uzyskania pożądanych wielkości niezbędne okazało się zastosowanie pewnych procedur optymalizacyjnych, które zostały sprowadzone do postaci liniowych zadań całkowitoliczbowych.

2.1. Model Wydziału Tkalni

Model, zarówno Wydziału Tkalni, jak i Wykańczalni, jest zasadniczo funkcją produkcji, która odwzorowuje proces przetwarzania czynników produkcji (surowców, energii, wykorzystania siły roboczej) w pożądane produkty końcowe (dywany i chodniki). Schemat procesu produkcyjnego z ukazaniem poszczególnych stanowisk oraz podstawowych parametrów technicznych z nimi związanych przedstawiony jest na rys. 3.

Problem, jaki się ujawnia przy modelowaniu Wydziału Tkalni, związany jest z takim ustaleniem planu produkcji, czyli ustaleniem, jaki produkt na jakiej maszynie ma być wytwarzany, który pozwoli na uzyskanie planowanej struktury sprzedaży oraz zapewni racjonalizację produkcji. Taki plan otrzymywany jest jako rozwiązanie pewnego zadania liniowego.

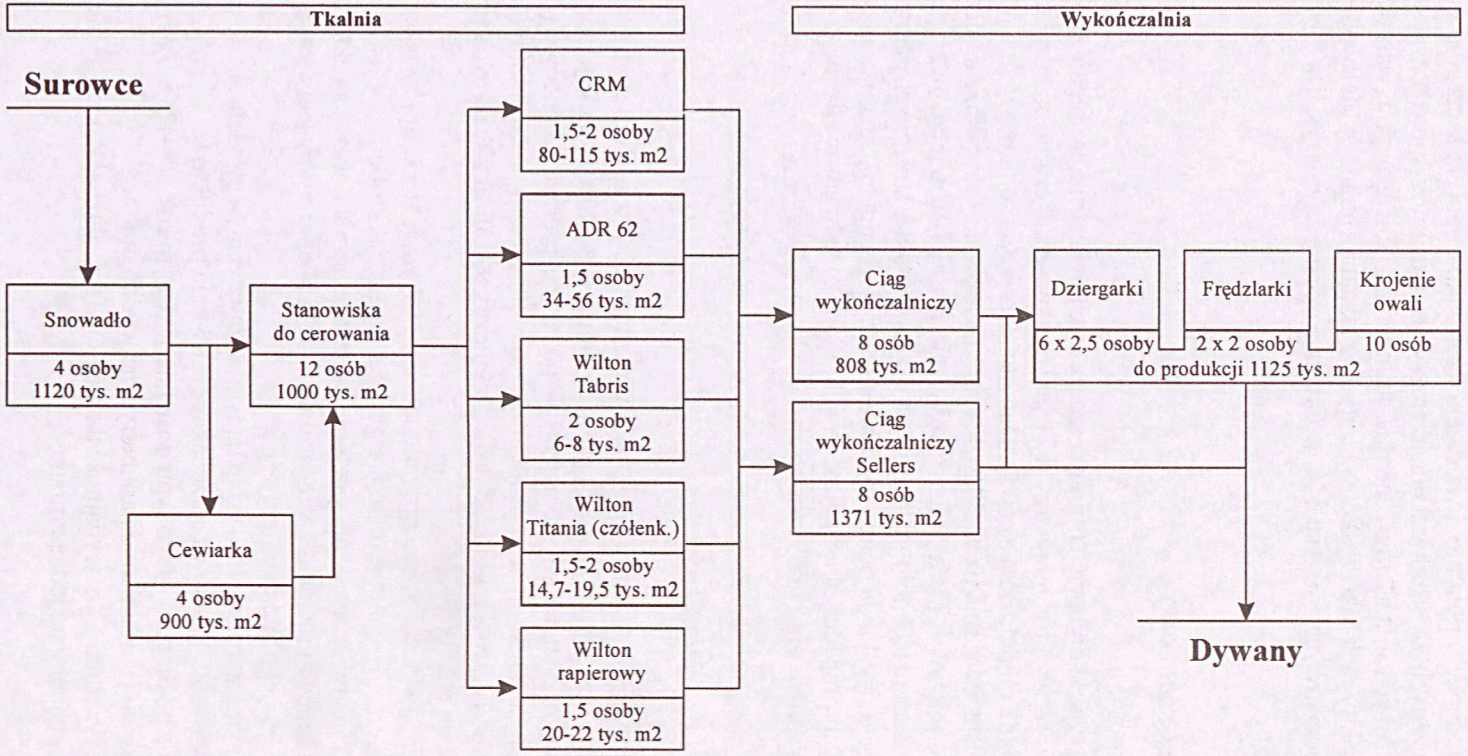
Zmiennymi sterującymi występującymi w omawianym modelu są:

- S_i – planowana ilościowa sprzedaż roczna i-tego produktu (i=1, …, LP),
- LT_j – liczba maszyn j-tego typu dostępna w danym roku (j=1, …, LM).

Dodatkowo jako zmienne parametryczne wyodrębniono:

- WT_{ij} – wyrażona w m^2 wydajność tkania i-tego wyrobu na j-tej maszynie w skali roku przy pracy na jedną zmianę,

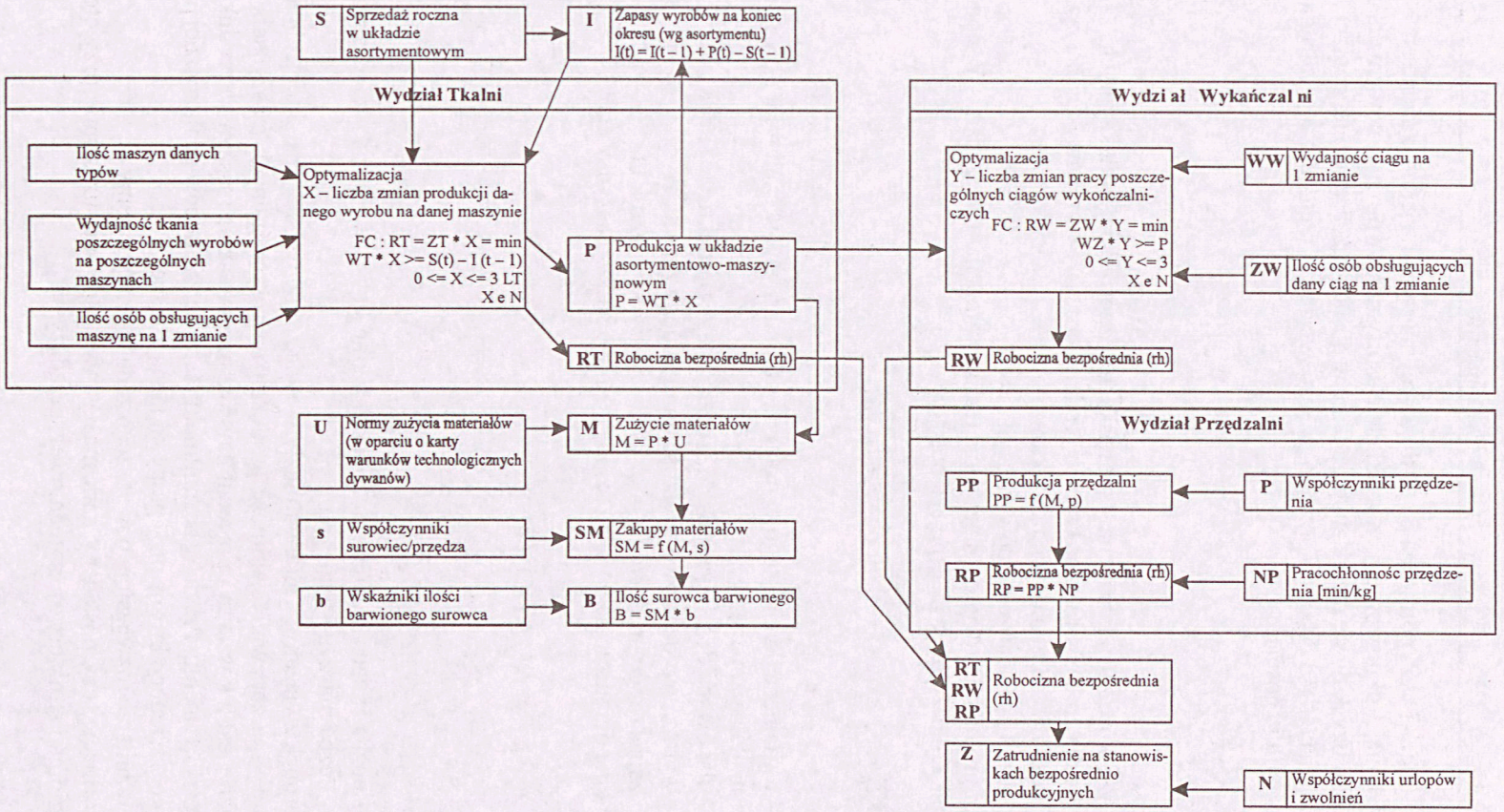
Zatrudnienie na 1 zmianę i wydajność roczna przy pracy na 1 zmianę



Rys. 3. Schemat procesów tkania i wykańczania w fabryce dywanów

•ródło: opracowanie własne na podstawie danych uzyskanych w fabryce

Wielkości w układzie rocznym



Rys. 4. Model rzeczowy fabryki dywanów

•ródło: opracowanie własne

- ZT_j – liczba osób potrzebna do obsługi j-tej maszyny na jednej zmianie.

Ustalenie struktury produkcji w układzie asortymentowo-maszynowym dla danego roku uzyskuje się rozwiązując zadanie w postaci przedstawionej poniżej.

Funkcja celu, co do której przyjęto, że jest związana z racjonalizacją zatrudnienia, przyjmuje postać:

$$RT = \sum_{i=1}^{LP} \sum_{j=1}^{LM} ZT_j \cdot X_{ij} \rightarrow \min, \tag{1}$$

gdzie:

RT – wielkość zatrudnienia na stanowiskach bezpośrednio produkcyjnych,
X_{ij} – liczba zmian w roku na których produkuje się i-ty wyrób na j-tej maszynie,
LP – liczba wyodrębnionych produktów,
LM – liczba posiadanych typów maszyn.

Plan produkcji powinien zapewnić, zrealizowanie planu sprzedaży. W modelu warunek ten przyjmuje następującą postać:

$$\sum_{j=1}^{LM} WT_{ij} \cdot X_{ij} \geq S_i \cdot (1+r) - I_i^{t-1} \quad \forall i = \overline{1, LP}, \tag{2}$$

gdzie:

WT_{ij} – wydajność tkania i-tego wyrobu na j-tej maszynie w skali roku przy pracy na jedną zmianę,
S_i – planowana ilościowa sprzedaż roczna i-tego produktu,
r – wyrażona procentowo wielkość minimalnego zapasu,
I_i^{t-1} – zapas i-tego produktu na początku rozpatrywanego roku t.

Kolejne ograniczenia wynikają z posiadanego parku maszynowego:

$$\begin{aligned} &0 \leq \sum_{i=1}^{LP} X_{ij} \leq 3 \cdot LT_j \quad \forall j = \overline{1, LM} \\ &X_{ij} \in C, \end{aligned} \tag{3}$$

gdzie:

X_{ij} – liczba zmian w roku na których produkuje się i-ty wyrób na j-tej maszynie,
LT_j – liczba maszyn j-tego typu.

Warunek związany z całkowitoliczbowością zmiennych ma charakter techniczny, który ma zapewnić stabilność produkcji na poszczególnych maszynach, co związane jest z kosztami i pracochłonnością przestawienia maszyn na produkcję innego asortymentu. Przyjęto, że minimalna seria będzie odpowiadała rocznej produkcji określonego krosna przy pracy na jedną zmianę.

W rezultacie rozwiązania powyższego zadania otrzymujemy :

- informację, czy posiadany park maszynowy zapewnia uzyskanie przyjętego poziomu i struktury asortymentowej sprzedaży,

- optymalny plan określający wykorzystanie czasu pracy poszczególnych maszyn (X_{ij}),
- wielkość produkcji poszczególnych produktów na Wydziale Tkalni

$$P_i = \sum_{j=1}^{LM} WT_{ij} \cdot X_{ij} \quad \forall i = \overline{1, LP}, \tag{4}$$

gdzie:
P_i – planowana roczna produkcja i-tego produktu,
WT_{ij} – wydajność tkania i-tego wyrobu na j-tej maszynie,
LP – liczba wyodrębnionych produktów,
LM – liczba posiadanych typów maszyn;

- zatrudnienie w Wydziale Tkalni w zakresie pracowników bezpośrednio produkcyjnych (RT);
- wielkość zapasów produktów na koniec roku w strukturze asortymentowej:

$$I_i^t = I_i^{t-1} + P_i - S_i \quad \forall i = \overline{1, LP}, \tag{5}$$

gdzie:
I_i^t – zapas i-tego produktu na koniec rozpatrywanego roku t,
I_i^{t-1} – zapas i-tego produktu na początku rozpatrywanego roku t,
S_i – planowana ilościowa sprzedaż roczna i-tego produktu.

2.2. Model Wydziału Wykańczalni

Model kolejnego wydziału fabryki bazuje na wynikach obliczeń opartych na modelu Wydziału Tkalni. Tym razem zmiennymi wejściowymi są:

- P_i – planowana roczna produkcja i-tego produktu (i=1, …, LP),
- WW_{ij} – wyrażona w m^2 wydajność wykańczania i-tego wyrobu na j-tym ciągu wykańczalniczym w skali roku przy pracy na jedną zmianę,
- ZW_j – liczba osób niezbędna do obsługi j-tego ciągu na jednej zmianie.

Procedura optymalizacyjna jest zbliżona do zastosowanej w modelu Wydziału Tkalni i polega na optymalizacji zatrudnienia

$$RW = \sum_{i=1}^{LP} \sum_{j=1}^{LW} ZW_j \cdot Y_{ij} \rightarrow \min, \tag{6}$$

gdzie:
RW – wielkość zatrudnienia na stanowiskach bezpośrednio produkcyjnych,
Y_{ij} – liczba zmian w roku na których dokonuje się końcowej obróbki i-tego wyrobu na j-tym ciągu,

LP – liczba wyodrębnionych produktów,
LW – liczba posiadanych ciągów wykańczalniczych.

Zdolności produkcyjne opisywanego wydziału powinny pozwolić na ostateczną obróbkę wszystkich utkanych dywanów i chodników, co można zapisać jako:

$$\sum_{j=1}^{LW} WW_{ij} \cdot Y_{ij} \geq P_i \ \forall i = \overline{1, LP}, \tag{7}$$

gdzie:
WW_{ij} – wydajność wykańczania i-tego wyrobu na j-tym ciągu wykańczalniczym,
P_i – planowana roczna produkcja i-tego produktu,
Y_{ij} – liczba zmian w roku na których dokonuje się końcowej obróbki i-tego wyrobu na j-tym ciągu,
LP – liczba wyodrębnionych produktów.

Ponieważ na Wydziale Wykańczalni można wyodrębnić jeden lub kilka ciągów, warunki wyznaczających ich maksymalne obciążenie przyjmują następującą postać:

$$\begin{aligned} &0 \leq \sum_{i=1}^{LP} Y_{ij} \leq 3 \ \forall j = \overline{1, LW} \\ &Y_{ij} \in C, \end{aligned} \tag{8}$$

gdzie:
Y_{ij} – obciążenie j-tego ciągu mierzone liczbą zmian w roku na których dokonuje się końcowej obróbki i-tego wyrobu,
LP – liczba wyodrębnionych produktów,
LW – liczba posiadanych ciągów wykańczalniczych.

Rozwiązując powyższe zadanie uzyskujemy:

- informację, czy posiadany park maszynowy na Wydziale Wykańczalni zapewnia końcową obróbkę wszystkich utkanych w Wydziale Tkalni dywanów i chodników,
- optymalny plan określający wykorzystanie czasu pracy poszczególnych ciągów (Y_{ij}),
- zatrudnienie w Wydziale Wykańczalni w zakresie pracowników bezpośrednio produkcyjnych (RW).

2.3. Zużycie surowców i materiałów

Dane uzyskane z fabryki pozwalają na szczegółowe rozpisanie w postaci strumieni rzeczowych dodatkowo dwóch rodzajów kosztów: zużycia surowców i materiałów oraz zużycia energii. Są to, obok kosztów osobowych (1/5 kosztów rodzajowych

ogółem), najbardziej istotne składniki kosztów. Łącznie ich udział w całości kosztów wynosi około 60%.

Do oszacowania zapotrzebowania na materiały, niezbędne są dane dotyczące norm zużycia poszczególnych materiałów zawarte w kartach warunków technologicznych, co w dalszej kolejności pozwala na zastosowanie wzoru

$$M_k = \sum_{i=1}^{LP} P_i \cdot U_{ik} \quad \forall k = \overline{1, LS}, \tag{9}$$

gdzie:
M_k – ilościowe zużycie materiałów k-tego rodzaju,
P_i – planowana roczna produkcja i-tego produktu,
U_{ik} – norma zużycia k-tego materiału do produkcji i-tego produktu,
LP – liczba wyodrębnionych produktów,
LS – liczba wydzielonych rodzajów materiałów.

Posiadając wielkość zapotrzebowania na materiały można oszacować zapotrzebowanie na zakupy surowca, które następnie są częściowo przetwarzane do postaci przędzy w Wydziale Przędzalni, oraz ilość surowca podlegającego usłudze barwienia.

2.4. Model Wydziału Przędzalni

Produkcja Wydziału Przędzalni jest związana z przygotowaniem surowca przed procesem tkania. Pożądaną wielkość produkcji, mierzoną ilością przerobionej przędzy, można oszacować stosując pewną funkcję zależną zasadniczo od zapotrzebowania na materiały (M_k)

$$PP_k = f(M_k, p_k, LTP_k) \quad \forall k = \overline{1, LS}, \tag{10}$$

gdzie:
PP_k – produkcja k-tego materiału w Wydziale Przędzalni,
p_k – współczynnik przędzenia związany z k-tym materiałem,
LTP_k – liczba maszyn ograniczająca zdolności uzyskiwania materiału k,
LS – liczba wydzielonych rodzajów materiałów.

Zapotrzebowanie na etaty bezpośrednio produkcyjne w opisywanym wydziale można zatem uzyskać jako:

$$RP = \sum_{k=1}^{LS} PP_k \cdot NP_k, \tag{11}$$

gdzie:
RP – wielkość zatrudnienia na stanowiskach bezpośrednio produkcyjnych,
PP_k – produkcja k-tego materiału,
NP_k – pracochłonność przędzenia k-tego materiału (w min/kg).

2.5. Poziom zatrudnienia

Posiadając dane dotyczące wszystkich wydziałów produkcyjnych można wyliczyć łączną wielkość zatrudnienia na stanowiskach bezpośrednio produkcyjnych (R).

$$R = RW + RT + RP, \tag{12}$$

gdzie:
RT – liczba pracowników bezpośrednio produkcyjnych na Wydziale Tkalni,
RW – liczba pracowników bezpośrednio produkcyjnych na Wydziale Wykańczalni,
RP – liczba pracowników bezpośrednio produkcyjnych na Wydziale Przędzalni.

Po uwzględnieniu współczynnika urlopów i zwolnień (uz), współczynnika poziomu zatrudnienia na stanowiskach pośrednio produkcyjnych (zp) oraz liczby stanowisk nieprodukcyjnych (zs) można oszacować łączny minimalny poziom zatrudnienia w fabryce w danym roku (Z), przy realizacji określonej strategii.

$$Z = \frac{R}{(1-uz)} \cdot (1+zp) + zs. \tag{13}$$

2.5. Zużycie energii

Szacunek zużycia energii jest kolejnym strumieniem rzeczowym, którego badanie jest pożądane (ze względu na udział kosztów energii w kosztach ogółem fabryki dywanów) i możliwe (dzięki uzyskaniu odpowiednio szczegółowych danych). Charakterystyczna dla omawianego kosztu jest zależność od wahań sezonowych oraz zmienność zależna od wielkości produkcji, przy istotnym poziomie (ogółem około połowy rocznego zużycia) kosztu stałego.

Wyodrębniono następujące trzy typy energii, których koszt zużycia jest istotny w fabryce dywanów:

- EC – energia cieplna (grzewcza), której zużycie zasadniczo związane jest z wahaniami sezonowymi – wyrażana jest w GJ;
- EP – energia cieplna (para), mierzona w GJ, jest energią w zasadniczym stopniu związaną z poziomem produkcji;

- *EE* – energia elektryczna (w kWh), której zużycie podlega zarówno wahaniom sezonowym, jak i wahaniom powiązanym ze zmianami skali produkcji.

Model szczegółowego rozbicia grzewczej energii cieplnej na poszczególne miesiące związany jest z oszacowaniem wskaźników sezonowości.

W celu oszacowania zużycia energii w postaci pary technologicznej skonstruowano model następującej postaci:

$$EP_t = 10 \cdot PC_t + 909, \tag{14}$$

gdzie:
EP_t – zużycie energii cieplnej (para) w miesiącu t ($t = 1, \ldots, 12$),
PC_t – łączna produkcja wyrażona w m^2 w miesiącu t.

Zużycie energii elektrycznej można dość dobrze oszacować ($R^2>0,8$), za pomocą poniższego wzoru:

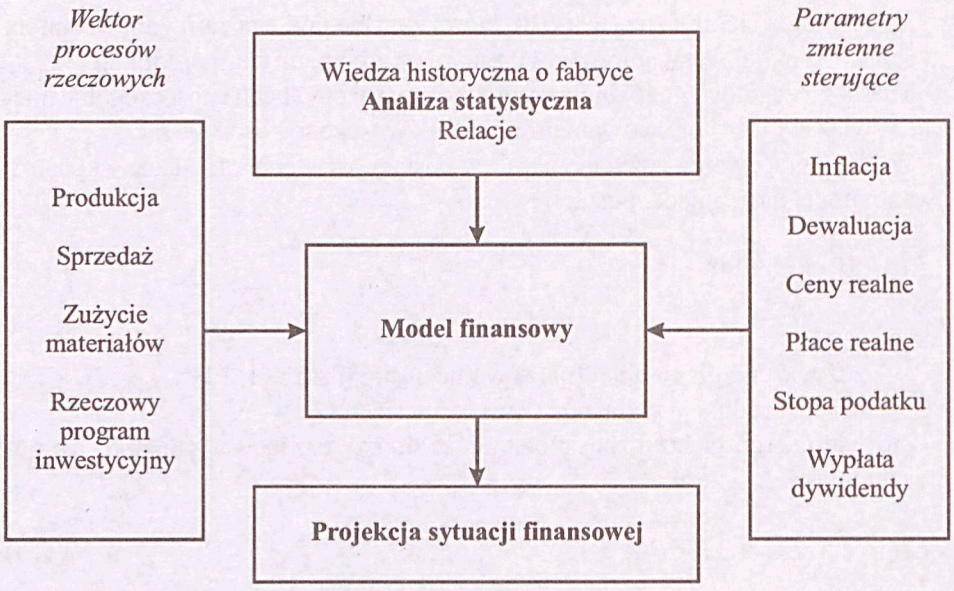
$$EE_t = 3,5 \cdot EC_t + 3936 PC_t + 484924 \tag{15}$$

gdzie:
EE_t – zużycie energii elektrycznej w miesiącu t ($t = 1, \ldots, 12$),
EC_t – zużycie energii cieplnej (grzewczej) w miesiącu t; odpowiednik wahań sezonowych,
PC_t – łączna produkcja wyrażona w m^2 w miesiącu t.

3. Model finansowy

Model finansowy w cenach stałych tworzony jest przez przypisanie do poszczególnych wielkości otrzymanych z modelu rzeczowego cen produktów i cen wydzielonych czynników produkcji wraz z zakładanymi zmianami cen realnych (rys.5). Następnie uzupełniany jest on zależnościami wynikającymi z analizy kapitału obrotowego i relacjami z zakresu finansów przedsiębiorstwa. Nakładane są na to parametry związane z otoczeniem fabryki (takie jak stopa podatkowa, wypłacane dywidendy). Model w cenach nominalnych otrzymywany jest przez uzupełnienie modelu o wpływ inflacji oraz procesów związanych z wahaniami kursów walutowych oraz zakładanymi zmianami stóp procentowych. Za pomocą modelu finansowego uzyskuje się ocenę sytuacji finansowej fabryki w postaci przepływów pieniężnych, rachunku zysków i strat oraz bilansu przedsiębiorstwa.

Na rys. 6 przedstawiony jest schemat wzajemnego wpływu poszczególnych zmiennych wykorzystywanych w szacowaniu wyników finansowych.



Rys.5. Model finansowy fabryki dywanów
•ródło: K.Linowski, Moduł finansowego modelu symulacyjnego (maszynopis)

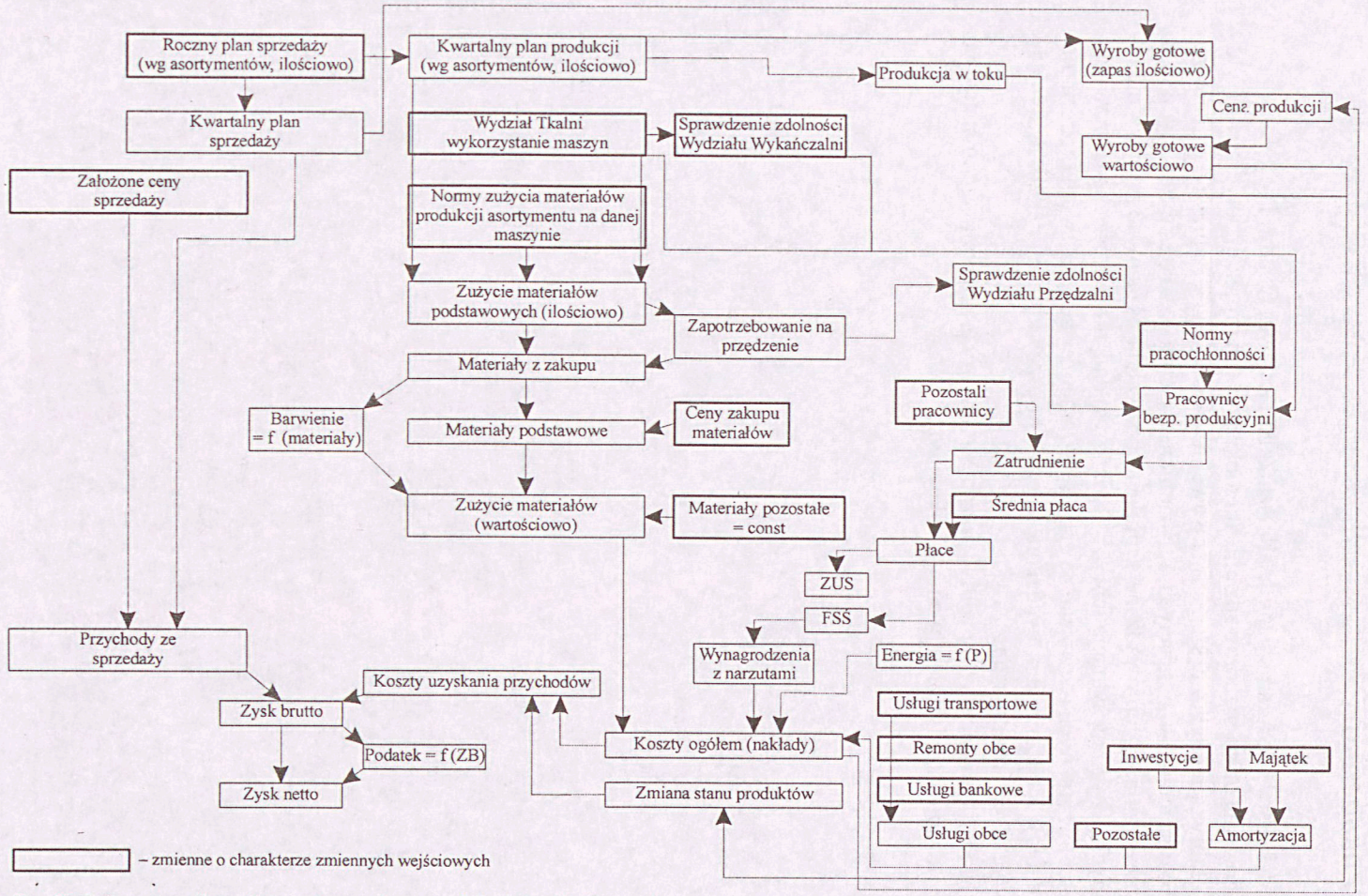
W fabryce dywanów charakterystyczne jest występowanie sezonowych wahań sprzedaży z maksymalnymi poziomami w kwartałach I i IV. Występujący cykl produkcyjny nie pokrywa się z cyklem sprzedaży i wymaga odrębnego ustalenia. Wahania sprzedaży i produkcji szacowane są za pomocą współczynników sezonowości ustalanych dla każdego okresu.

Elementy kapitału obrotowego w modelu wyznaczane są w większości drogą szacowania współczynników obrotu, np.:

- *Zapas materiałów* – zależnie od zużycia materiałów (wielkość uzyskiwana z modelu rzeczowego);
- *Zobowiązania bieżące* (bez kredytów) są ustalane proporcjonalnie do ponoszonych kosztów kasowych (koszty rodzajowe bez amortyzacji);
- *Należności handlowe* – oszacowane są przy pomocy współczynników związanych z przychodami ze sprzedaży.

Omawiany model umożliwia zastosowanie różnych sposobów finansowania majątku obrotowego, łącznie z uwzględnieniem skutków akcji marketingowych.

Zmienną bilansującą cały model, a zarazem wielkością kontrolną, jest poziom środków pieniężnych po stronie aktywów. Ich ujemna wartość interpretowana jest jako niedobór bieżących środków i pokrywana, w określonym zakresie, przez kredyt obrotowy.



Rys.6. Schemat zależności zmiennych w modelu fabryki dywanów

•ródło: opracowanie własne

4. Zakończenie

Model został oprogramowany w arkuszu kalkulacyjnym Quattro Pro.

Pozwala on na przeprowadzanie długookresowych projekcji dotyczących sytuacji fabryki, nie tylko w sferze finansowej. Umożliwia także sprawne przeprowadzenie szacunków związanych z ustalaniem strategii w zakresie inwestycji oraz finansowania. Przeprowadzane symulacje pozwalają oszacować wpływy planowanych decyzji na sytuację fabryki. Dodatkowo dają możliwość zbadania wrażliwości otrzymanych rozwiązań na zmiany parametrów zewnętrznych (np. cen materiałów), a także przeprowadzenia testów dla przewidywania skutków sytuacji krytycznych (*stress testing*).

Model symulacyjny może być wszechstronnym narzędziem wspomagającym zarządzanie przedsiębiorstwem produkcyjnym.