

**Marek Dudek**

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

## **ZARZĄDZANIE FRAKTALNYMI STRUKTURAMI SYSTEMÓW WYTWÓRCZYCH**

### **1. Wstęp**

Przystosowanie się do nowych warunków wytwarzania w zmiennym otoczeniu jest możliwe dzięki zmienności struktur wytwórczych. Nowoczesne koncepcje zorganizowania systemów są podłożem do tworzenia tychże struktur, które powinny zapewniać elastyczność operacyjną i strukturalną. Każda ze znanych nowoczesnych koncepcji organizacji charakteryzuje się strukturą sieciową kooperujących jednostek, modułów. Struktura fraktalna także jest budowana z podobnych do siebie modułów będących w ciągłej rekonfiguracji. W tego typu strukturze dekompozycja na zadania cząstkowe może się odbywać w „systemach centralnego planowania” (szczególnie zadań kluczowych), w których to realizowany jest przydział zadań do istniejących zasobów. Taki kontrolowany rozdział ma zapewniać synchronizację wykonywania zadań z głównymi celami systemu. Cele systemu, szczególnie te operacyjne, mogą się bardzo szybko zmieniać wraz ze zmianami statusu systemu i pod wpływem zmian otoczenia. Projektować się zatem powinno takie systemy, które w sposób szybki i efektywny potrafią dokonywać rekonfiguracji i alokacji swoich zasobów. Zorientowane na cele systemy fraktalne mogą zatem spełniać wymagania współczesnego wytwarzania.

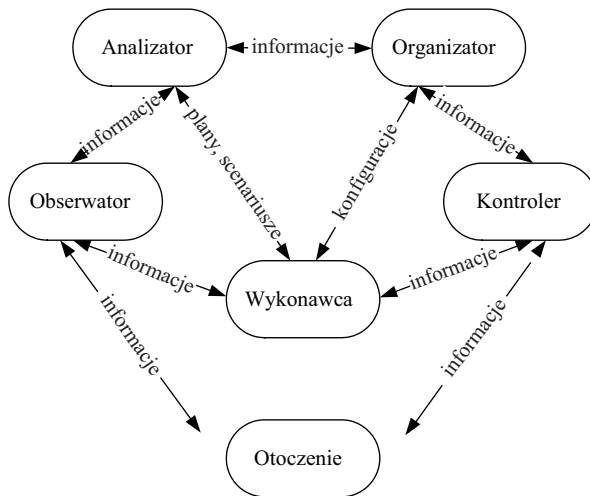
Celem artykułu jest stworzenie struktury systemów wytwórczych zorganizowanych fraktalnie na zasadach podobnych do tzw. FMP (*Fractal Manufacturing Partnership*). Zastosowanie tego podejścia pozwoli zorganizować procesy logistyczne między fraktalami oraz stworzyć zasady zarządzania takimi systemami w kierunku zasad opierających się na *lean manufacturing*. Do budowy sieci kooperujących fraktali można wykorzystać narzędzie symulacyjne.

### **2. Fraktalna struktura systemu wytwarzania**

Sprostanie wymaganiom współczesnego wytwarzania jest możliwe dzięki dynamicznej i elastycznej rekonfiguracji systemu. System fraktalny jest jedną z kilku

nowoczesnych koncepcji, która potrafi sprostać tym wymaganiom [Ryu, Yücesan, Jung 2006, s. 3105]. Koncepcja fraktalnego wytwarzania pozwala na alokację zadań wytwórczych między podobne wielofunkcyjne moduły zdolne do wytwarzania szerokiego asortymentu produktów z rodziny wyrobów podobnych [Saad, Lassila 2006, s. 109]. Fraktalny system wytwórczy tworzy się z elementów zwanych fraktalami (BFU – *Basic Fraktal Unit*), które mogą być reprezentacją zadania lub stanowiska roboczego (grupy stanowisk) lub całości systemu wytwarzania. Fraktale działają niezależnie od siebie i wykonują własne bieżące zadania. Elementem spajającym jest przebieg procesu (zadanie, cel) narzucający układ ich zależności. Każdy fraktal realizuje zatem swoje cele niezależnie od siebie, na równych prawach rozwiązując ewentualne konflikty na drodze negocjacji. Struktura składająca się z takich obiektów tworzona jest przez powiązania w sieci współpracy, które określane są przez [Mazur 2007, s. 14]:

- wiązkę celów organizacji jako całości,
- system informacyjno-komunikacyjny,
- system ocen.



Rys. 1. Struktura systemu zarządzania fraktalami

Źródło: [Kwangyeol, Moonsoo, Mooyoung 2001].

Dynamiczne zachowanie się fraktali w zmiennym otoczeniu oznacza „umiejętność szybkiego reagowania na zmieniające się warunki działania” [Brzeziński (red.) 2002, s. 311], co z kolei zapewnia vitalność działania organizacji jako całości, rozumianej jako „zdolność do skutecznego działania w warunkach zmian z głównym celem [...] harmonizacji wymagań otoczenia ze zdolnościami przedsiębiorstwa” [Brzeziński (red.) 2002, s. 311]. Struktura taka mająca elementy dobrane pod wzglę-

dem realizowanych funkcji posiada odpowiednie mechanizmy, do których zaliczamy [Kwangyeol, Moonsoo, Mooyoung 2001, s. 93] (rys. 1):

- mechanizm obserwacji,
- mechanizm organizacji,
- mechanizm zarządzający,
- mechanizm analizujący,
- mechanizm kontrolujący.

### 3. Budowa struktury fraktalnej – analiza przypadku

Przy budowie struktury fraktalnej przyjęto założenie, iż będzie to tylko struktura uwzględniająca uwarunkowania wytwórcze. Budowa docelowej struktury powinna się opierać także na innych przesłanki projektowe, chociażby takich, które wynikają z założeń zgodnych z GFP (*Goal Formation Process*), wykorzystywanych do projektowania systemów fraktalnych [Kwangyeol, Mooyoung 2004, s. 2210]. Takie założenie jest adekwatne do zaistniałej sytuacji, gdyż przyszłą strukturę tworzyć będą małe autonomiczne systemy wytwórcze (małe przedsiębiorstwa produkcyjne) połączone między innymi celem:

- uniezależnienia się od źródeł zaopatrzenia,
- przeciwstawienia się konkurencji,
- dywersyfikacji oferowanych produktów,
- minimalizacji kosztów obsługi,
- zwiększenia wykorzystania posiadanych zasobów.

Organizacja struktury prowadzi do pogrupowania realizowanych zadań i ulokowania ich w przestrzeni w taki sposób, aby umożliwić określenie elastycznych ścieżek ich realizacji [Mazur 2007, s. 30]. Organizacja procesów i ich struktury sprowadza się do budowy sieci powiązań wewnętrznych i/lub zewnętrznych, której węzłami są moduły stanowiące elementy systemu wytwarzania. Sieć taka rozumiana jest jako struktura kooperacyjna modułów [Mazur 2007, s. 40]. Konfiguracja fraktalna pozwala łączyć moduły będące elementami innych systemów wytwórczych charakteryzujących się ponadto innymi parametrami, co pozwala osiągnąć im najwyższą elastyczność.

Koncepcja budowy takiej struktury była inicjatywą wynikającą z uwarunkowań rynku, a zgłoszoną przez pięć małych przedsiębiorstw produkcyjnych działających w branży odzieżowej. Ta inicjatywa była odpowiedzią na:

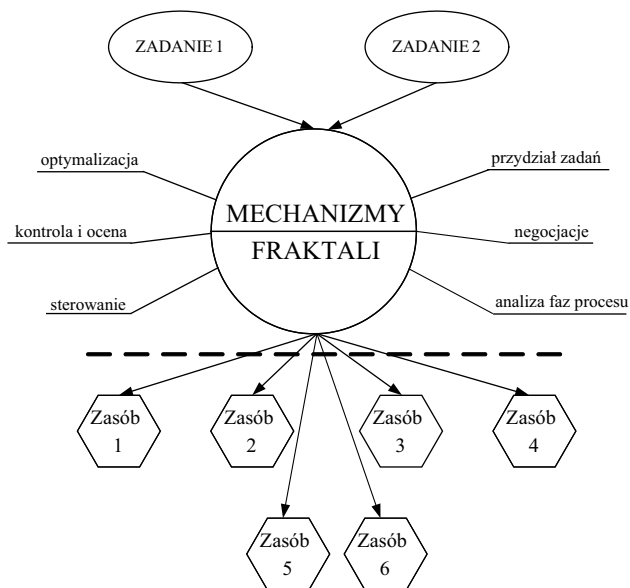
- kurczące się rynki zbytu,
- zapotrzebowanie na dywersyfikację oferty produktowej,
- zyskiwanie coraz większego udziału w rynku dwóch dużych konkurentów z branży,
- chęć większego wykorzystania posiadanych, a niewykorzystywanych zasobów,
- zwiększone zapotrzebowanie na produkty branżowe (specjalne),
- brak własnych zasobów na realizację wszystkich zadań,

- brak mechanizmów obronnych przed dużymi konkurentami,
- niewystarczające nakłady na własny rozwój,
- chęć zamknięcia wewnętrznego rynku przed napływającą konkurencją zewnętrzną.

Zdecydowano się zatem między innymi na:

- wspólną politykę w ramach procesów łańcucha dostaw (między innymi wspólne zaopatrzenie, dystrybucję),
- wspólne planowanie i sterowanie procesami wytwarzania w ramach zasobów wspólnych (możliwość podpisywania kilkakrotnie większych kontraktów),
- wspólne prace badawczo-rozwojowe (wspólne projektowanie i wspólna oferta produktowa kluczowych pozycji asortymentowych),
- przeznaczenie ok. 70% dostępnych zasobów każdego z fraktali do struktury sieciowej,
- pozostawienie pozostałych 30% w ramach drobnych, indywidualnych kontraktów,
- stworzenie wspólnego systemu do zarządzania nową strukturą.

Analiza możliwości adaptacyjnych tych przedsiębiorstw wykazała, iż nie da się obecnie stworzyć czystej struktury fraktalnej. Zaproponowano zatem dwa etapy działań: stworzenie struktury przejściowej do zarządzania takim systemem, a także tworzenie struktury docelowej.



Rys. 2. Struktura docelowa systemu

Źródło: opracowanie własne.

Struktura przejściowa powstała w wyniku braku możliwości organizacyjnych wdrożenia docelowego rozwiązania. Zaproponowano, aby czasowo czynności związane z zarządzaniem taką strukturą przejął jeden z fraktali, desygnując do tego przedsięwzięcia swoje zasoby. Spośród pięciu przedsiębiorstw wybrano to, które zagwarantowało, ze względu na swoje zasoby, możliwość najlepszej koordynacji procesów. Koordynacja odbywa się przy wykorzystaniu dostępnych służb i ogranicza się tylko do koordynacji poszczególnych faz procesu wytwórczego. Taka organizacja nie zapewnia najkorzystniejszych konfiguracji procesów i nie prowadzi do alokacji zasobów fraktali. Nie synchronizuje procesów głównych z pomocniczymi, tworząc przebiegi czasowe dłuższe niż modelowe.

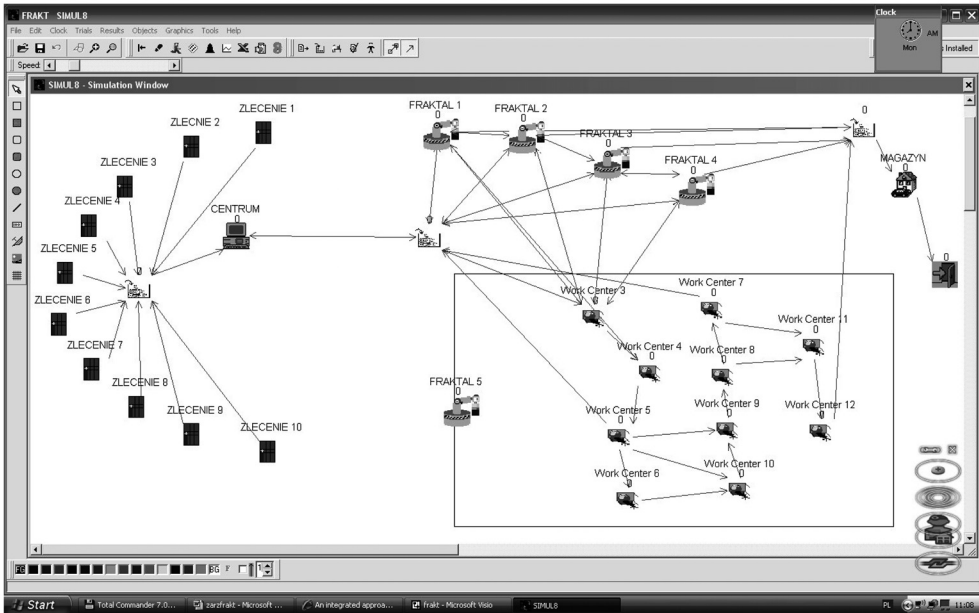
Struktura docelowa wymaga stworzenia zespołu do zarządzania taką strukturą oraz uporządkowania, a następnie stworzenia sprawnego systemu wymiany informacji. Zasugerowano, wykorzystując fakt, iż struktura fraktalna jest na etapie tworzenia, aby elementy tworzące taki zespół nie pochodziły z wewnętrznych źródeł poszczególnych fraktali. Zaproponowano zatem stworzenie oddzielnego podmiotu (np. przedsiębiorstwa) do zarządzania fraktalną strukturą wytwórczą. Taki podmiot powinien przejąć wszystkie funkcje logistyczne poszczególnych fraktali w obrębie wydzielonych zadań. Zarządzanie tym systemem powinno się opierać na zasadach określonych w odniesieniu do organizacji sieciowych i wirtualnych na podstawie zasad kooperacji ustalonych wewnątrz systemu, zgodnie z wytycznymi zorganizowania fraktalnego (stworzenie odpowiednich mechanizmów); rys. 2.

#### **4. Wykorzystanie modelowania symulacyjnego do organizacji struktury docelowej**

Podstawowym celem konstrukcji modelu symulacyjnego była optymalizacja przebiegu procesów mających miejsce we fraktalnych strukturach wytwórczych. Przeprowadzone eksperymenty miały na celu odpowiedni dobór elementów struktury oraz ocenę zaproponowanego wariantu organizacyjnego. Eksperymenty polegały na stopniowym przydzielaniu (podzlecaniu) operacji kooperantom (przy założeniu, iż każdy może wykonać ten sam zestaw operacji) oraz na ocenie uzyskanego rozwiązania za pomocą mierników czasu i kosztu procesu wytwarzania. Zastosowanie modelu symulacyjnego do rozwiązania tego typu zadania wynikało z:

- elastyczności narzędzia, rozumianej jako łatwość wprowadzenia zmian w modelu symulowanego procesu,
- łatwości wprowadzenia różnego rodzaju wymuszeń i zakłóceń,
- stosunkowo niewielkiego kosztu i czasu przygotowania symulacji,
- wiarygodności wyników symulacji w szczególności, gdy możemy porównać otrzymane wyniki symulacji z danymi otrzymanymi z pomiarów na rzeczywistym obiekcie [Tarnowski, Bartkiewicz 1998, s. 32].

Stworzono model struktury fraktalnej (5 fraktali) (rys. 3), za pomocą którego badano różne możliwości konfiguracyjne struktury przy stałym koszyku zamówień (11 zadań).



Rys. 3. Schemat powiązań kooperacyjnych analizowanego systemu

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem programu Simul8.

Z powodu autonomiczności fraktali założono, iż zasoby przeznaczone do dyspozycji struktury fraktalnej wynoszą ok. 70% dysponowanych zasobów poszczególnych fraktali. Dekompozycja na zadania cząstkowe odbywała się automatycznie (w centrum – mechanizmy fraktali) według kryterium najkrótszego czasu realizacji. Wytyczanie ścieżek realizacji (marszruty) odbywało się automatycznie po wcześniejszym zaimplementowaniu technologii wytwarzania do modelu. W modelu uwzględniono czasy pomocnicze (transport wewnętrzny, przezbrojenia, czynności obsługowe itp.) oraz ewentualne czasy transportu zewnętrznego w przypadku kooperacji międzyoperacyjnych.

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów udało się stworzyć najkorzystniejszy rozdział zadań na poszczególne fraktale. Ze względu na autonomiczność fraktali tworzących strukturę fraktalną trudno jednoznacznie stwierdzić, czy otrzymany układ konfiguracyjny jest najkorzystniejszy z punktu widzenia każdego fraktala z osobna. Z punktu widzenia całości systemu można stwierdzić, iż przy założonych parametrach wejściowych daje się stworzyć najkorzystniejszy w danych

warunkach układ strukturalny (jakie zasoby i z jakiego fraktala). Analiza czasowo-kosztowa wykazała, iż:

- możliwe jest wykorzystanie modelowania symulacyjnego do budowy nowoczesnych różniących się od siebie układów strukturalnych,
- możliwa jest budowa różnych sieci kooperacji ze względu na różne charakterystyki czasowo-kosztowe,
- możliwy jest wybór między różnymi układami strukturalnymi ze względu na założone kryterium optymalizacyjne,
- wraz ze wzrostem liczby kooperacji zewnętrznych maleje koszt realizacji zadania (bez kosztów transportu zewnętrznego),
- równomierny rozdział zadań na poszczególne fraktale jest efektywniejszy niż w przypadku realizacji całości zadania przez pojedynczy fraktal,
- centralny rozdział zadań przynosi równomierniejsze wykorzystanie zdolności produkcyjnych (nie ma przeciążeń zasobów).

## 5. Zakończenie

Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że lepsze zorganizowanie jest możliwe przez efektywniejsze wykorzystanie dostępnych zasobów oraz znajomości możliwych układów konfiguracyjnych w sieci. Przez działania mające na celu:

- lepsze wykorzystanie dostępnego parku maszynowego,
- lepsze rozłożenie produkcji w czasie,
- proporcjonalne obciążenie urzędzeń,
- zmianę konfiguracji przestrzennej

możemy zwiększyć elastyczność struktury wytwarzania. Istnieje zatem możliwość odpowiedniego doboru zasobów spośród możliwych i dostępnych zasobów każdego z fraktali.

Wszystkie formy organizacji elastycznej produkcji ewoluują w kierunku autonomicznym i samouczącym. Struktura fraktalna podkreśla jednak rolę otoczenia zarówno biznesowego, jak i ludzkiego w rozwoju elastycznego systemu produkcji, podczas gdy pozostałe koncepcje wydają się koncentrować na technologii mającej zapewnić elastyczne i inteligentne formy automatyzacji przyrządów i wyposażenia. Struktura fraktalna pozwala także na wydzielenie zbędnych zasobów produkcyjnych i wykorzystanie ich do realizacji zadań stworzonej do tego celu organizacji fraktalnej. Przewidywanie możliwych do wystąpienia konfiguracji przebiegu procesów daje możliwość wyboru najkorzystniejszej konfiguracji systemu wytwarzania (zbioru fraktali tworzących system). Przeprowadzone badania wskazują jednoznacznie, iż warunkiem koniecznym „egzystencji” małych przedsiębiorstw o charakterze wytwórczym jest posiadanie struktury zdolnej do adaptacji. Im wyższy poziom adaptacyjności struktury, tym większe prawdopodobieństwo odniesienia sukcesu rynkowego. Wydaje się zatem uzasadnione tworzenie nowoczesnych struktur wytwórczych bardzo często złożonych z oddzielnych, samodzielnych jednostek połączonych celem wykonania określonych zadań.

Budowa mechanizmów zarządzania strukturą fraktalną wymaga odpowiedniego doboru poszczególnych komponentów systemu. Warto podkreślić, iż modelowanie symulacyjne jest tylko narzędziem optymalizacji przebiegu procesów, a nie narzędziem do zarządzania taką strukturą.

## Literatura

- Brzeziński M. (red.), *Organizacja i sterowanie produkcją*, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa 2002.
- Heinrich S., Durr H., Hanel T., Lassig J., *An agent-based manufacturing management system for production and logistic within cross-company regional and national production networks*, „International Journal of Advanced Robotic Systems” 2005, vol. 2, no. 1.
- Kwangyeol R., Moonsoo S., Mooyoung J., *A methodology for implementing agent-based controllers in the fractal manufacturing system*, Engineering Design and Automation, Las Vegas 2001.
- Kwangyeol R., Mooyoung J., *Goal-orientation mechanism in a fractal manufacturing system*, „International Journal of Production Research” 2004, vol. 42, no. 11.
- Matuszek J., *Inżynieria produkcji*, Wydawnictwo PŁ, Bielsko Biała 2000.
- Mazur Z., *Zarządzanie procesami w systemach wytwarzania*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2007.
- Ryu K., Yücesan E., Jung M., *Dynamic restructuring process for self-reconfiguration in the fractal manufacturing system*, „International Journal of Production Research” 2006, vol. 44, no. 15.
- Saad S.M., Lassila A.M., *An integrated approach for shop floor configuration in fractal manufacturing systems*, „International Journal of Services and Operations Management” 2006, vol. 2, no. 2.
- Tarnowski W., Bartkiewicz S., *Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa dynamicznych procesów ciągłych*, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 1998.

## MANAGEMENT OF FRACTAL STRUCTURES OF MANUFACTURING SYSTEMS

### Summary

To meet the rapidly changing customer needs in the manufacturing environment, future manufacturing systems must be dynamically and flexibly reconfigured. The fractal manufacturing system is one of the new manufacturing concepts that can meet such requirements. Fractal manufacturing is an emerging concept that allocates the production resources into similar multifunctional cells capable of processing a wide variety of products. Fractal system is comprised of a number of basic components, each of which consists of five functional modules: an observer, an analyzer, an organizer, a resolver, and a reporter. Each of these modules, using agent technology, autonomously co-operates and negotiates with others while processing its own jobs. In this paper, the author suggests to make use of simulation models to choose one of the most profitable logical structures of fractal manufacturing system. The results indicate that the procedure is efficient and that model layout optimization can improve production flows.