

Jerzy Stamirowski¹

ELASTYCZNOŚĆ SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH W KONTEKŚCIE DYNAMIKI PRODUKCJI

Streszczenie. Elastyczność produkcji charakteryzująca się możliwością reagowania na zmiany wielkości produkcji i technologiczny rozwój produktu uważana jest za jeden z podstawowych sposobów odpowiedzi na wymagania rynków. Intensywne inwestowanie w elastyczność jest jednak poważnym obciążeniem finansowym dla rywalizujących ze sobą firm. Stało się to przyczyną poszukiwania nowego podejścia do projektowania zautomatyzowanych systemów produkcyjnych, które pozwoliłyby zapewnić systemowi wymagany poziom elastyczności przy względnie umiarkowanych kosztach. Powstają koncepcje budowy systemów o elastyczności odpowiadającej charakterowi bieżącej produkcji i posiadających w przyszłości możliwość przystosowania do określonego niepewnością rozwoju produktu. Znaczenie tego tematu potwierdzone jest wzrostem zainteresowania przedsiębiorstw stawiających pierwsze kroki na polu elastycznej automatyzacji. Jedną z koncepcji proponuje systemy o wymaganej zgodnej z potrzebami elastyczności o nazwie Focused Flexibility Manufacturing Systems (FFMS) [1].

Słowa kluczowe: projektowanie, zautomatyzowany system produkcyjny, elastyczny system produkcyjny, ESP, FMS, nastawialny elastyczny system produkcyjny, FFMS.

ELASTYCZNA PRODUKCJA I NIEPEWNOŚCI RYNKU

Współczesne przedsiębiorstwa produkcyjne muszą radzić sobie na ogólnosiwiatowym rynku ze wzrastającym naciskiem wymagań konkurencji. W ostatniej dekadzie w wyniku przeprowadzanej przez rywalizujące ze sobą przedsiębiorstwa modernizacji systemów wytwarzania, uległy głębokim zmianom metody produkcji wytwarzanych w dużych ilościach komponentów mechanicznych montowanych w końcowych produktach (np. samochodach, pojazdach przemysłowych itp.). Można zaobserwować następujące tendencje:

- Komponenty strategiczne produkowane są przez przedsiębiorstwa, które wytwarzają produkty końcowe. Dla tych strategicznych komponentów firmy określają długoterminowe plany rozwoju, czego konsekwencją jest charakterystyka technologiczna, możliwa do przewidziania z dobrą dokładnością na drodze ewolucji.
- Komponenty mniej krytyczne produkowane są na zewnątrz. Producenci tych komponentów próbują uzyskać zmniejszenie kosztów, przez powiększenie

¹ Politechnika Świętokrzyska

skali produkcji i typizację, specjalizując się w produkcji wybranych typów komponentów.

Ale nawet przedsiębiorstwa posiadające ustabilizowaną produkcję wyrobów produkowanych w dużych ilościach muszą radzić sobie z częstymi modyfikacjami i krótkimi cyklami życia produktu. Czynniki te zmuszają producentów do oceny potrzeby zmiany posiadanych systemów produkcyjnych i oceny ich opłacalności. Dla dynamicznie zmieniających się sektorów produkcji (tj: motoryzacja, elektronika i wysokie technologie), które charakteryzują się częstymi zmianami technologii i wielkości produkcji jest to zagadnienie dość złożone i kosztowne.

Konkurencyjność produkcji określają następujące parametry krytyczne:

- krótki czas produkcji,
- wysoka jakość,
- reakcja na częste zmiany wymagań rynku,
- racjonalne koszty produkcji. [2].

Uzyskanie optymalnej wielkości każdego z tych parametrów może okazać się zbyt trudne i staje się przyczyną definiowania przez przedsiębiorstwa celów „pomiędzy” krytycznymi wartościami wymienionych parametrów [3]. Dodatkowo, informacja dotycząca zmian produkcji jest często niepewna i producenci podejmując decyzje nie są zdolni do dokładnej oceny prawdopodobieństwa określającego alternatywne scenariusze produkcji w przyszłości.

Należy jednak mieć świadomość tego, że parametry produkcji określają wymagania nakładane na zautomatyzowane systemy produkcyjne i wywierają bardzo duży wpływ na działalność projektową. Projektowanie systemów produkcyjnych uwzględniających obecne i przyszłe scenariusze produkcji staje się więc procesem wysoce złożonym i obciążonym dużym stopniem ryzyka, a uzyskanie w tym kontekście wymaganych zdolności produkcyjnych może być szczególnie trudne [4].

Dedykowane systemy produkcyjne nie są odpowiednie przy dużych zmianach produkcji, nawet jeśli są one konkurencyjne z punktu widzenia kosztów. Z drugiej jednak strony duża ilość eksploatowanych elastycznych systemów produkcyjnych ma nadmierną, często niewykorzystaną elastyczność zwiększającą zbytnio koszty produkcji. Duża elastyczność produkcji nie zawsze jest więc pożądaną cechą systemu i w pewnych przypadkach może wpływać na zysk firmy. Nie mniej jednak w firmach, które chcą brać aktywny udział we współzawodnictwie na rynku, elastyczność produkcji może pełnić pozytywną rolę strategiczną [5,6].

Interesujące dla wielu klientów oraz firm projektujących i dostarczających systemy produkcyjne może być tworzenie systemów, których poziom elastyczności przystosowany jest do bieżących zadań produkcyjnych i uwzględnia

równocześnie rozwiązania dla przyszłości. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że modyfikowanie elastyczności systemu dostarcza z jednej strony ekonomicznych korzyści w sensie zmniejszenia kosztów inwestowania, ale z drugiej strony, redukuje pewien margines bezpieczeństwa, pozwalający dopasować elastyczność do bieżących i przyszłych zadań produkcyjnych.

Obserwacje te stały się przyczyną zracjonalizowania podejścia do projektowania i wytwarzania elastycznych systemów produkcyjnych. Konieczne stało się wypracowanie metod projektowania, pozwalających uzyskać przy realizacji obecnych i przyszłych zadań produkcyjnych równowagę pomiędzy wymaganiami odnoszącymi się do zdolności produkcyjnych, a elastycznością i kosztami [7].

Projektowanie systemów o wymaganym poziomie elastyczności wymusza bardzo wnikliwą i ostrożną ocenę potrzeb i ryzyka. Powinno ono uwzględniać wszystkie działania począwszy od zdefiniowania strategii produkcji, aż do określenia konfiguracji i potrzebnych rekonfiguracji, co z kolei wiąże się z koniecznością przeprojektowywania i ponownej integracji systemu. Zrealizowanie wymagań, pozwalających uzyskać konkurencyjne rozwiązania, zmusza do stosowania w metodach projektowania kombinacji wiedzy z różnych dziedzin.

Zastosowanie w produkcji systemów o wymaganej elastyczności jest szczególnie ważne dla producentów maszyn i urządzeń technologicznych. Należy pamiętać, że podstawą konkurencyjności jest zdolność przystosowywania produktów do potrzeb klientów. Nie zawsze prowadzi to do konieczności projektowania maszyn na podstawie nowych koncepcji. Często przystosowanie do nowych wymagań można uzyskać przez kombinację już istniejących zasobów. Nowe urządzenia mogą być często integrowane ze starymi, np. elastyczne maszyny obróbkowe mogą być obsługiwane sztywnym transportem taśmowym.

ELASTYCZNOŚCI W SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH

Uzyskanie wymaganego poziomu elastyczności produkcji powinno być brane pod uwagę już w fazie projektowania systemu.

W literaturze można znaleźć opis przemysłowych przypadków pokazujących niezadowolające osiągnięcia elastycznych systemów produkcyjnych [8]. Należą do nich przypadki niewykorzystywania dostępnej elastyczności [9] lub przypadki pokazujące, że kierownictwo widzi elastyczność bardziej jako źródło niepożądanych komplikacji, niż źródło potencjalnych korzyści dla firmy. Czasami elastyczność może wydawać się zbędna na poziomie strategicznym, szczególnie wtedy, kiedy niepewność związana z charakterem produkcji jest ograniczona przez zawarte kontrakty.

Tradycyjne, dedykowane sztywne linie produkcyjne (Rigid Transfer Line - RTL) używane są do produkcji rodziny części o małej liczbie odmian, produkowanych w dużych ilościach. RTL charakteryzują się niską skalowalnością, obsługują rynek pracując tylko dla wybranych części o typowych wymiarach. Ze względu na małą elastyczność nie stwarzają perspektyw dostosowania do przyszłych potrzeb klientów. W konsekwencji, w wielu sytuacjach RTL nie działają na pełnej mocy.

Z drugiej strony, elastyczne systemy produkcyjne (FMS) i maszyny równoległe FMS (PM-FMS) projektowane są z myślą o obsłudze większości możliwych technologicznych zmian produktu. Na redukcję ich rozprzestrzeniania się w przeszłości miały jednak duży wpływ dość wysokie koszty ich zakupu [10], chociaż pewne znaczenie miał i nadal ma nie wszędzie odpowiedni poziom kultury technicznej. Główną przyczyną poszukiwania nowych rozwiązań stały się jednak koszty.

Niedawne badania wydają się wskazywać, że dość dobrą odpowiedzią na potrzeby automatyzacji produkcji o zmiennym profilu przy założeniu dość umiarkowanych kosztów inwestowania mogą być rekonfigurowalność i systemy o wymaganej elastyczności Focused Flexibility Manufacturing Systems (FFMS) [1, 11].

Rekonfigurowalność opisywana jest jako zdolność do przebrojenia niedużym wysiłkiem i przy niedużych kosztach działającego systemu produkcyjnego lub urządzenia, przez dodanie lub usunięcie członów funkcjonalnych, w wyniku którego można przy minimalnym opóźnieniu przejść na produkcję nowej rodziny części lub podzespołów [2].

Rekonfigurowalność można uzyskać na poziomie maszyn i urządzeń lub na poziomie systemu.

Rekonfiguralne zasoby produkcyjne (maszyny i urządzenia) muszą być zaprojektowane z rozważeniem pewnych jakościowych i ilościowych wymagań tj.: modułowość, integralność, zdolność do modyfikacji, skalowalność, zamienność i diagnostyka. Chociaż koncepcja zmiany parametrów zasobu (maszyna, urządzenie) jest obiecująca, na obecnym etapie rozwoju oprogramowania i technologii sprzętu komputerowego w wielu przypadkach może to być zadanie dość trudno osiągalne.

Odwrotnie, rekonfigurowalność na poziomie systemu może być uzyskana łatwiej przez użycie już istniejących zasobów. System produkcyjny powinien mieć zdolność rekonfiguracji wtedy, kiedy wymaga tego zmiana produkcji [12]. Niestety to podejście również nie zawsze jest efektywne i może stwarzać pewne niebezpieczeństwa. Po pierwsze – opcja rekonfiguracji powinna zostać zaprojektowana tak, żeby implementacja była zakończona wtedy, kiedy wystąpią zmiany. Po drugie – jakaś kolejna rekonfiguracja w czasie cyklu życia systemu może prowadzić poza poniesieniem kosztów instalacji do wzrostu kosztów obsługi maszyn, awarii, straconej produkcji i konieczności nauki.

Odnosząc się do systemu FFMS uważa się, że umożliwia on dobór elastyczności do potrzeb i powinien racjonalizować osadzanie elastyczności w systemach produkcyjnych. Pewne możliwości modyfikowania elastyczności systemu bez potrzeby rekonfiguracji powinny prowadzić również do zmniejszenia kosztów eksploatacji systemu podczas całego cyklu życia systemu. Wymagany w FFMS poziom elastyczności powinien poradzić sobie ze zmianami wielkościami produkcji i różnorodnością zmian technologicznych, które będą miały miejsce w niedalekiej przyszłości.

Uwzględnienie w projektowanej architekturze systemu wymaganej elastyczności prowadzi często do powstania systemów skrzyżowanych, tzn. zintegrowanych systemów zautomatyzowanych, w których detale mogą być obrabiane na maszynach ogólnego przeznaczenia i dedykowanych. Jest to jeden z ważnych wyróżników systemu FFMS, który często powstaje w wyniku odpowiedniego dopasowania systemu FMS i dedykowanego systemu produkcyjnego. FFMS jest często w zamyśle systemem skrzyżowanym.

Na pierwszy rzut oka FFMS wydaje się być podobny do Rekonfigurowalnego Systemu Wytwarzania (RMS). Różnica pomiędzy tymi systemami, które należą do dwóch różnych klas, określona jest przedziałem czasu, w którym systemy uzyskują określoną elastyczność [13]. Decydując się na elastyczność lub rekonfigurowalność należy rozważyć dwie opcje.

Pierwsza z rekonfiguracją dotyczy projektowania wyspecjalizowanych systemów z możliwością rekonfiguracji w przyszłości, kiedy wystąpią zmiany produkcji. W związku z tym początkowa wersja systemu powinna być zaprojektowana z minimalnym poziomem elastyczności, dostosowanym do charakteru obecnej produkcji. Do projektu powinien być dołączony plan przyszłych możliwych rekonfiguracji.

Druga, oparta na systemie FFMS, w celu uniknięcia nadmiernych przyszłych rekonfiguracji, uwzględnia w pierwszej wersji elastyczność większą od wymaganej przez obecny charakter produkcji. W tym przypadku system FFMS ma zaprojektowane trochę dodatkowej elastyczności, dzięki której powinien poradzić sobie z przyszłymi zmianami produkcji, tzn. poziom elastyczności uwzględnia obecne i częściowo przyszłe problemy produkcyjne.

Wybór między projektowaniem z opcją rekonfiguracji i opcją o wymaganej elastyczności powinien być oparty o analizę kosztów inwestycji.

Innym zagadnieniem, które powinno zostać rozważone, jest wpływ warunków przemysłowych na racjonalizację elastyczności. Nawet jeśli kontekst aktualnej produkcji i występujące sytuacje odpowiadają filozofii FFMS, decydującą rolę odgrywa często tradycja i umiejętności praktyczne twórców systemu maszynowego i narzędziowego. Często firmy mimo zgody na FFMS, nie decydują się na poniesienie ryzyka i wysiłków związanych z projektowaniem tej architektury. W ostateczności przy dłuższym przedziale czasowym projektanci i producenci systemu maszynowego powinni kierować się zyskownością FFMS

w porównaniu z FMS i RMS. Obecnie już wielu wytwórców systemów produkcyjnych próbuje tworzyć architektury, które do jakiegoś stopnia są pierwszymi krokami budowy FFMS.

PROBLEMATYKA PROJEKTOWANIA ZAUTOMATYZOWANYCH SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH Z WYMAGANĄ ELASTYCZNOŚCIĄ

Uzyskanie systemu o konfiguracji zapewniającej wymaganą elastyczność wymaga odnoszenia się do różnych aspektów cyklu życia wyrobu z uwzględnieniem przede wszystkim etapów projektowania i produkcji. Problem projektowania i budowy systemu powinien brać pod uwagę paletę różnych zagadnień, z których ważniejsze to: analiza strategii produkcji, analiza scenariuszy produkcji i ich ewaluacji, analiza rozwoju technologii i urządzeń technologicznych, ocena ryzyka i techniki zarządzania. Rozległość i interdyscyplinarność procesu projektowania może być jedną z przyczyn niewystarczającego wyeksponowania złożonych problemów projektowania i budowy zautomatyzowanych elastycznych systemów produkcyjnych.

Pierwsze kluczowe zagadnienie charakteryzujące proces projektowania (w szczególności FFMS) wywodzi się z potrzeby wyjaśnienia zależności pomiędzy różnymi rodzajami elastyczności a wynikami przedsiębiorstwa oraz działaniami technicznymi i organizacyjnymi prowadzącymi do jej osiągnięcia. Brak tej wiedzy może być krytycznym problemem dla kierownictwa, które powinno bez ponoszenia większego ryzyka przyjąć właściwy kurs uwzględnienia elastyczności w systemach produkcyjnych. Dlatego pełne zrozumienie procesu wprowadzania elastycznej automatyzacji i docenienie związanych z nią problemów powinno prowadzić do konieczności zbadania (na ile jest to możliwe) rozwiązań zrealizowanych przez różne przedsiębiorstwa krajowe i zagraniczne. Ważne jest rozwinięcie empirycznych badań nad zastosowaniem elastycznej automatyzacji przez uzyskanie danych z firm które ją stosują w produkcji i które przewidują w przyszłości automatyzację produkcji. Analizy powinny pokazać również, jak firmy, które nie stosują FMS, uporały się z wymaganiami elastyczności produkcji i jak są nastawione do FFMS i rekonfiguracji. Nie należy się przy tym kierować wyłącznie obecnym poziomem elastycznej automatyzacji w firmach krajowych.

Rozwiązanie zagadnień projektowania systemu ułatwiają zdefiniowane dość dokładnie ilościowe oceny wymaganych form elastyczności przedstawione w wielu pracach (np. [12, 17,18]), które mają duży wkład w dążeniu do dokładnego identyfikowania profili wymaganej elastyczności. Jakkolwiek celem tych prac było definiowanie elastyczności w terminach ilościowych uzyskane wyniki często skłaniają się do ocen jakościowych.

Nie jest jeszcze dobrze rozwiązany problem zapewnienia opłacalnego rozwoju wyrobów przy jednoczesnym panowaniu nad kosztami poprawy elastyczności systemów produkcyjnych.

Odpowiednio dużo uwagi należy poświęcić analizie problemu produkcji. Podejścia mają być operacyjne i pragmatyczne. W metodologii projektowania przy definiowaniu charakterystyki produkcji należy uwzględnić technologiczny rozwój wyrobów w czasie. Konieczne staje się dokładne zdefiniowanie wyróżniających cech produkcji i zbudowanie zintegrowanych modeli czerpiących z doświadczeń pochodzących z innych obszarów wiedzy.

Szczególną uwagę należy również zwrócić na następujące zagadnienie krytyczne. Redukcja poziomu elastyczności zmniejsza zdolność wariantowania produkcji, podczas gdy nadmiar elastyczności zwiększa zdolność wariantowania produkcji.

Można dojść do wniosku, że kluczową rolę w zaprojektowaniu systemu o wymaganym poziomie elastyczności odgrywa odpowiednia metodologia i narzędzia, pozwalające zaprojektować wymagany profil elastyczności uwzględniający niepewność związaną z technologicznym rozwojem wyrobu w czasie, a w następnej kolejności pozwalające zaprojektować system zdolny zabezpieczyć zaprojektowany profil elastyczności w produkcji. Wymagana jest tu również właściwa ocena charakterystyk różnych architektur systemu zbudowanych na bazie różnych maszyn i ocena możliwości uzyskania wymaganej elastyczności w procesie wdrażaniu systemu.

W związku ze złożonością i interdyscyplinarnością procesu projektowania zautomatyzowanych systemów produkcyjnych z elastycznością, czynności procesu projektowania muszą być wspomagane w znacznym zakresie przez system komputerowy typu systemu ekspertowego.

Aktorzy procesu projektowania

W procesie projektowania FFMS bierze równocześnie udział dwóch aktorów: Użytkownik Systemu i Projektant Systemu Maszynowego. Dla celów porządkowych interakcje pomiędzy aktorami można przedstawić na Diagramie Czynności (Activity Diagram) UML. Użytkownik wysyła zapytanie ofertowe do jednego lub większej liczby Projektantów Systemu Maszynowego. Każdy projektant przeprowadza wstępną ocenę możliwości wykonania. Jeżeli oferta jest interesująca projektant projektuje system, który spełnia wymagania produkcji odnoszące się do typów produktu i wielkości produkcji zdefiniowanej przez klienta. Wstępna konfiguracja systemu opracowana jest zwykle na podstawie technicznej analizy problemu produkcji przez projektantów systemu maszynowego. Kiedy użytkownik systemu otrzymuje zbiór propozycji, może dokonać wstępnej oceny efektywności inwestowania. Jeżeli ocena wypadła zadowalająco projektant rozpoczyna prace prowadzące do zbudowania systemu.

Mamy tu do czynienia z dwoma typami aktorów, z których każdy widzi ofertę i problem projektowania systemu ze swojej perspektywy. Kiedy na początku problem zostanie przez obu przestudiowany od strony ekonomicznej i technologicznej w późniejszej fazie pozostaje rozstrzygnąć tylko problemy handlowe, już bez wglębienia się w aspekty techniczne.

Brak spójnej informacji uzyskanej od aktorów, na podstawie której określone są cele budowy systemu, może doprowadzić do powstania systemu o nieodpowiednich parametrach. Może to się zdarzyć wtedy, kiedy użytkownik myli się co do przewidywanych wymagań lub gdy projektant próbując sobie radzić z niepełną informacją uzyskaną od klienta zaprojektował system z nadmierną elastycznością, który zawiera elementy systemu sprawdzonego i mającego już pewien sukces przy sprzedaży.

Zarys procesu projektowania

Projektowanie systemu rozpoczyna się od analizy kontekstu produkcji i domyślnie zdefiniowanego poziomu elastyczności, bez rozważania istniejących taksonomi i klasyfikacji elastyczności.

Podstawowym problemem procesu projektowania FFMS jest zrozumienie strumieni informacji biorących udział w prawidłowym przebiegu procesu projektowania systemu. Konieczne staje się zdefiniowanie i sformalizowanie danych w strumieniach informacji opisujących środowisko przemysłowe. Odnoszą się one głównie do wyrobu, procesu technologicznego i systemu produkcji, które wynikają z zamówienia klienta. Muszą być również uwzględnione relacje istniejące pomiędzy obiektami z wymienionych wyżej obszarów, które są istotne dla procesu projektowania. Dane i relacje grają ważną rolę łączącą przy konfigurowaniu architektury systemu [1].

Wejściem do procesu projektowania są również zgromadzone informacje o podobnych i potencjalnych produktach, fizycznych urządzeniach uwzględnianych przy ustalaniu parku maszynowego, architekturach systemu (tzn. różnych zaimplementowanych typach architektur np. architektura liniowa, FMS) oraz kosztach inwestowania i kosztach obsługi.

Pierwsze dane wyjściowe z procesu projektowania FFMS powinny dotyczyć oceny uzyskanej elastyczności w odniesieniu do profilu produkcji. Jeżeli uzyskana elastyczność odpowiada założonej, przystępuje się do definiowania specyfikacji systemu (zbiór zasobów system) i budowy określonej konfiguracji systemu z uwzględnieniem ewentualnych rekonfiguracji. Analiza kosztu pozwala oceniać ekonomiczne zalety założonej elastyczności.

Proces projektowania FFMS musi również uwzględniać zbiór ograniczeń wynikających ze strategii i wymagań produkcji, celów budowy systemu oraz zmian pojawiających się w przebiegu cyklu życia systemu.

Obszar zagadnień poddawanych analizie w pierwszym okresie procesu projektowania łączy różne podstawowe pola badań tj.: strategię wytwarzania, planowanie procesu, metody projektowania, planowanie rodzaju i wielkości produkcji, ocenę ewaluacji produkcji. Stosowane w procesie projektowania metody i narzędzia powinny dostarczać uogólnionego podejścia, pozwalającego wprowadzić do systemu założony poziom elastyczności i umożliwić badanie wpływu różnych czynników na poprawność pracy systemu. Powinny również dostarczyć praktycznych technik umożliwiających między innymi: generowanie scenariuszy, programowanie stochastyczne i symulację. Problemy wynikające w trakcie projektowania systemu powinny być analizowane zarówno przez użytkownika systemu, jak i projektanta systemu maszynowego.

Analizując strategię wytwarzania użytkownik powinien dostarczać projektantowi identyfikację różnych wariantów produkcji, na podstawie których określana jest wymagana elastyczność. Na podstawie analizy konfiguracji uzyskanych przez projektanta, użytkownik może planować etapy zakupów i odnawiania zasobów, planując w ten sposób cykl życia systemu. Urządzenia uwzględniające rozwiązania pozwalające na prace systemu przy alternatywnych programach produkcji wynikających z rozwoju wyrobu wybiera projektant.

W zależności od uzgodnionych wymagań można zaprojektować system zarówno z wymaganą elastycznością, jak i system o najwyższej elastyczności dla którego przyjęto nazwę Flexibility Manufacturing Systems (FMS) lub Elastyczny System Produkcyjny (ESP). Konfiguracje mogą być używane do analizy porównawczej systemów FFMS i FMS. Porównania pozwalają ocenić zyskowność rozwiązania FFMS i wybrać najkorzystniejsze rozwiązanie z alternatywnych konfiguracji. Analiza realizowana jest z wykorzystaniem techniki symulacji [15,16].

Uwagi o danych charakteryzujących produkcję

Analiza strategiczna powinna definiować przewidywane do produkcji rodziny części i ich cykl życia. Definiowane są one przez informacje charakteryzujące geometrię, wymagania jakościowe części, proces technologiczny i wielkości produkcji. Rzeczywisty kontekst produkcji realizowanej w systemach elastycznych o wymaganej elastyczności charakteryzowany jest typowo przez:

- rozwój wyrobu zgodny z cyklem życia;
- przebieg produkcji rodzin wyrobu w czasie; różne wersje produktu mogą być produkowane jednocześnie lub nie;
- określenie korelacji pomiędzy wersją wyrobu i rodziną wyrobu;
- ponadto musi być uwzględniony cykl życia wyrobu (wzrost produkcji - stabilizacja-spadek).

Nieodłączny problem – zmienność produkcji prowadzi do zróżnicowanej ewolucji rodziny wyrobu i wersji. Problem ten wprowadza do procesu projektowania element niepewności. Dlatego zarządzanie produkcją, w której mamy do czynienia z kombinacją wielu wyrobów przy uwzględnieniu ich perspektywicznej ewolucji, może być problemem dość trudnym. Przedstawienie tego problemu mogą uprościć scenariusze w postaci drzewa, gdzie wszystkie węzły drzewa mają przypisane prawdopodobieństwo realizacji i reprezentują zdarzenie produkcyjne zachodzące w określonym czasie [1].

Przy opracowywaniu szczegółowej strategii firmy która decyduje się na wprowadzeniu rozwiązań elastycznych powinny być również rozważane posunięcia konkurencji. Potwierdzenie rentowności założonej elastyczności powinno być poparte doświadczeniami z realnych sytuacjach pozwalających zaadoptować pewne istniejące rozwiązania spójne ze strategią produkcji.

Określenie wymagań dla urządzeń

Jak już mówiliśmy, kluczową kwestią problemu projektowego stanowi zbieranie i formalizacja informacji o obecnym i przyszłym procesie produkcji. W szczególności dane te zostaną użyte przez użytkownika systemu do sformułowania wymagań dla projektantów i realizatorów systemu.

Po zebraniu informacji o produkcji rozpoczyna się analiza procesu technologicznego i procesu produkcji. W czasie analizy określa się alternatywne plany przebiegu procesu produkcji detali i opracowuje szczegółowe marszruty przy możliwych do zastosowania zasobach produkcyjnych. Sprowadza się to do określenia właściwych operacji i ich kolejności w realnym środowisku przemysłowym.

Na tym etapie powinny zostać zbudowane poprawne modele wykorzystujące informacje związane z każdym produktem (wielkość produkcji, dane technologiczne i geometryczne), według których należy zbudować moduły programowe, które w procesie implementacji zapewnią techniczne połączenie pomiędzy procesem technologicznym i zasobami produkcyjnymi (maszynami). Informacje te, używane jako dane wejściowe modułów programowych, powinny być na tyle szczegółowe, żeby można było uzyskać zależności pomiędzy maszynami i operacjami oraz maszynami i paletami. Należy również uwzględnić konfiguracje palet i ich przemieszczenia przy obróbce zróżnicowanych rodzin detali. Dotyczy to również ustalenia ruchów roboczych i szybkich.

Projektowanie konfiguracji systemu

Dla realizacji procesów technologicznych wynikających z analizy strategii należy opracować metody projektowania konfiguracji systemu. W zależności od charakteru zmienności produkcji przedstawionych w modelach scenariusza, używa

się różnych metod konfigurowania i realizacji systemu. Przy zmienności opisywanej modelami deterministycznymi, jesteśmy w posiadaniu dokładnej informacji dotyczące produkcji w przyszłości, podczas gdy w modelach stochastycznych zakłada się niepewność wynikającą z prognoz. Ponadto w modelu stochastycznym problem planowania produkcji w określonym horyzoncie czasowym może być dwu- lub wieloetapowy. W procesie projektowania konfiguracji systemu można wykorzystywać przedstawione niżej trzy modele:

- w podejściu deterministycznym scenariusze ewaluacji nie wiążą przebiegu w czasie z prawdopodobieństwem realizacji, dzięki czemu możliwe jest dość dokładniejsze określenie konfiguracji;
- w podejściu stochastycznym dwuetapowym sekwencje scenariuszy produkcji uwzględniają krótkie przedziały czasu, przywiązując do węzłów scenariusza prawdopodobieństwem ich realizacji. W oparciu o takie scenariusze możemy zbudować ograniczoną liczbę konfiguracji z przypisanymi do nich poziomami niepewności realizacji;
- w podejściu stochastycznym wieloetapowym mamy do czynienia ze złożonymi scenariuszami produkcji przedstawionymi przeważnie w postaci drzewa, którego węzły mają określone prawdopodobieństwo realizacji. Ze względu na złożoność scenariuszy istnieją tu dużo większe możliwości modelowania różnych konfiguracji, jak również rekonfiguracji systemu z przypisanymi im poziomami niepewności realizacji

Wszystkie te metody dążą do minimalizacji kosztów inwestycyjnych i są rozwiązaniami optymalnymi z punktu widzenia użytkownika systemu, ale nie muszą być najlepsze z punktu widzenia projektantów konfigurujących park maszynowy. W rzeczywistości projektant dąży do maksymalizacji oczekiwanego zysku niekoniecznie przy minimalnych kosztach systemu, co staje się przyczyną pewnego konfliktu. Ostatecznie oferta zaprojektowanego systemu powinna składać się z dwu części: rozwiązania technicznego (konfiguracja i ewentualnie przyszłe rekonfiguracje systemu) oraz uwarunkowań ekonomicznych (cena, czas zwrotu nakładów).

Ocena projektu systemu

Na wyjściu projektanci uzyskali plan konfiguracji i ewentualnych rekonfiguracji systemu. Rozwiązanie to wymaga jednak przeprowadzenia przez użytkownika weryfikacji zgodnie z planowanym cyklem życia systemu. Ten krok wymaga weryfikującej analizy technologicznej i ekonomicznej różnych cech rozwiązań systemu pozwalającej dokonać oceny gospodarczej i finansowej z perspektywy użytkownika. Wskazana jest weryfikacja ustaleń przez innych

projektantów wspierających podjęcie decyzji dotyczących wyboru stopnia elastyczności (FMS,FFMS) i konfiguracji systemu.

Wykorzystywana jest tu analiza Real Options Analysis (ROA) [1], pozwalająca z większą precyzją ocenić elastyczność w warunkach przemysłowych, jej ewaluację oraz planowane wydatki kapitałowe.

Narzędzie oceny cyklu życia systemu składa się z dwóch modułów. Pierwszy moduł pobiera na wejściu zbiór węzłów scenariusza i konfiguracji, a następnie przedstawia oceny konfiguracji w odniesieniu do różnych węzłów scenariusza. Wartości oceny stają się wejściem do drugiego modułu, który dostarcza na wyjściu konfiguracje systemu uwzględniające planowany horyzont czasowy. W wyniku analiz na wyjściu powinniśmy otrzymać dwie propozycje systemu: FMS i FFMS z możliwościami ewentualnych rekonfiguracji, charakteryzujące się minimalnym kosztem przy założonych wymaganiach technicznych.

Następnie należy ocenić pracę konfiguracji przez analizę wszystkich decyzji podejmowanych przez użytkownika podczas pracy systemu, Ocena pracy zaprojektowanego systemu jest zrealizowana przy pomocy narzędzi do symulacji [1,15,16]. Zastosowanie narzędzi symulacji pozwala testować pracę systemu przy realizacji różnych zmiennych zadań produkcyjnych, a następnie ocenić rzeczywiste korzyści wynikające z elastyczności zaprojektowanej dla systemu produkcyjnego.

PODSUMOWANIE

Elastyczność produkcji uważana jest za jeden z podstawowych sposobów odpowiedzi na wymagania rynków. Poważne obciążenia finansowe związane z zakupem i eksploatacją FMS wywołują jednak, pomimo świadomości zalet tego rodzaju automatyzacji, ostrożne zachowania wielu potencjalnych użytkowników. Odpowiedzią projektantów i dostawców zautomatyzowanych systemów produkcyjnych na zachowania użytkowników jest poszukiwanie nowych metod projektowania, pozwalających na zbudowanie systemów o wymaganym poziomie elastyczności przy względnie umiarkowanych kosztach. W związku z powyższym powstają koncepcje budowy systemów o elastyczności odpowiadającej charakterowi bieżącej produkcji i posiadających możliwość przystosowania do określonego niepewnością rozwoju produktu w przyszłości. Zwiększona została oferta możliwych metod uelastycznienia produkcji przemysłowej. Klient uzyskał możliwość wyboru pomiędzy systemami FMS, FFMS i systemami RMS z możliwością rekonfiguracji. Przedstawione nowe propozycje spowodowały wzrost zainteresowania przedsiębiorstw tym sposobem modernizacji produkcji. Dotyczy to w szczególności firm stawiających pierwsze kroki na polu elastycznej automatyzacji [1]. Dla dalszego rozwoju elastycznej automatyzacji niezbędne wydają się dalsze prace nad doskonaleniem metodologii

projektowania oraz rozwojem komputerowych systemów wspomagających projektanta w przebiegu złożonego procesu projektowania. Prace te powinny prowadzić do budowy systemów o elastyczności pozwalające jeszcze lepiej zaspokajać bieżące i przyszłe potrzeby użytkownika.

LITERATURA

1. T. Tolio (redaktor), *Design of Flexible Production Systems*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
2. Wiendahl HP, ElMaraghy HA, Nyhuis P, Wiendahl HH, Duffie N, Brieke M., *Changeable manufacturing – classification, design and operation*, Ann CIRP 2007.
3. Chrystolouris G., *Flexibility and its measurement*, Ann CIRP 1996.
4. Matta A, Semeraro Q., *Design advanced manufacturing systems – models for capacity planning in advanced manufacturing systems*, Springer, New York, 2005.
5. Cantamessa M, Capello C., *Flexibility in manufacturing – outlining an empiricallybased method for its valuation*. 8th AITeM Conference, Montecatini Terme, 2007.
6. Terkaj W, Tolio T, ValenteA., *Focused flexibility in production systems*. Springer, New York, 2008.
7. Ganzi E. Tolio T., *Configuration and Re-Configuration of Manufacturing Systems with Focused Flexibility*. 6th Convegno A.I.Te.M., Gaeta, Sept 2003.
8. Landers RG, *A new paradigm in machine tools: Reconfigurable machine tools*, Japan-USA symposium on flexible automation, Ann Arbor, Michigan, 2000.
9. Matta A, Tolio T, Karaesmen F, Dallery Y., *An integrated approach for the configuration of automated manufacturing systems*. Robotics Comput. Integr. Manuf., 2001.
10. Sethi AK, Sethi SP., *Flexibility in manufacturing: a survey*. Int J Flex Manuf. Syst.1990.
11. Koren Y. *General RMS characteristics. Comparison with dedicated and flexible systems*. In: Dashchenko AI, *Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories*, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006.
12. Lech Mazurek. *Rozprawa doktorska „Zwiększenie efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych w elastycznych systemach produkcyjnych”*, Politechnika Lubelska, Lublin 2010.
13. Matta A, Tomasella M, Clerici M, Sacconi S. *Optimal reconfiguration policy to react to product changes*. Int J Prod Res, 2008.
14. Terkaj W, Tolio T, Valente A. *Focused flexibility in production systems*. 2008.
15. Zdanowicz R., Świder J. *Modelowanie i symulacja systemów produkcyjnych w programie Enterprise Dynamics*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
16. Jardzioch A. *Sterowanie elastycznymi systemami obróbkowymi z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*. Wydawnictwo Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, Szczecin 2009.
17. Świć A., Taranienko W. *Projektowanie technologiczne elastycznych systemów produkcyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003.
18. Koste L, Malhotra MK . *A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility*. J Oper Manag 18, 1999.

FLEXIBILITY OF PRODUCTION SYSTEMS IN THE CONTEXT OF THE PRODUCTION DYNAMICS

Summary

Flexibility is related to the technological development of a product and to frequent shifts in rate of production. However, investment in flexibility is a serious financial burden for many companies, which is why manufacturing system providers seek new solutions for designing systems of required flexibility at moderate costs. The idea is to construct a system of flexibility suited for a current manufacturing cycle while capable of being adjusted to the future development of the product, which as of today is unforeseeable. The significance of this concept is confirmed by an increased interest from the new enterprises in the field of flexible automation. One of the concepts introduces a system called Focused Flexibility Manufacturing Systems (FFMS) [1].

Key words: designing of an automated manufacturing system, flexible manufacturing system (FMS), ESP, adjustable flexible manufacturing system, FFMS.