

Rekonfigurowalne systemy produkcyjne – kierunki badań i zastosowania

Paweł Łukasik

Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Kolegium Nauk o Zarządzaniu i Jakości, Instytut Zarządzania, Katedra Zachowań Organizacyjnych

e-mail: lukasikp@uek.krakow.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych w aspekcie dotychczas przeprowadzonych badań oraz zastosowań praktycznych. Przedstawiona została definicja rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych oraz zmiany w gospodarce i produkcji będące zasadniczą przyczyną ich opracowania. W dalszej części artykułu omówiono poszczególne kierunki badań takie jak: rekonfigurowalność systemu, jego cechy, rezultaty zastosowania, badania stosowane oraz możliwość zastosowania w perspektywie przemysłu 4.0. Następnie została omówiona procedura projektowania rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych oraz przykładowe zastosowania.

Słowa kluczowe

zarządzanie produkcją, rekonfigurowalne systemy produkcyjne, elastyczne systemy produkcyjne

Wstęp

Koncepcja rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych powstała w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych pod wpływem takich czynników jak [Gola, 2014, s. 195; Gola i Świć, 2016, s. 21]:

- konieczność szybkiego wprowadzania nowego produktu na rynek;
- duże zróżnicowanie asortymentu produktów;
- niski i zmienny wolumen produkcji;
- ostra konkurencja cenowa i konieczność redukcji kosztów produkcji;
- duża zmienność otoczenia;
- globalna produkcja i konkurencja;
- szybki postęp technologiczny.

Na początku lat dziewięćdziesiątych rozpoczyna się w produkcji tzw. epoka wiedzy i trwa do dziś. Oprócz wspomnianych wyżej zmian szczególnie ważne jest szerokie zastosowanie komputerów w produkcji i projektowaniu nowych wyrobów. Komputery mają coraz większą moc obliczeniową a systemy komunikacji stają się coraz szybsze. Pojawiają się zdecentralizowane systemy produkcyjne o otwartej architekturze, w których łatwiej dokonywać zmian. Dzięki rozwojowi mikroelektroniki swoje pierwsze zastosowania znajdują również sensory. Zmiany te sprzyjają rozwojowi rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych i w 1996 roku powstaje ERC (The NSF Engineering Research Centre (ERC) for Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS) [Mehrabi i in., 2000, s. 411]. W tym miejscu należy również wspomnieć o rozwoju takiego nurtu jak zarządzanie wiedzą, który również miał miejsce w latach dziewięćdziesiątych XX wieku oraz o początku gospodarki opartej na wiedzy i zarządzania opartego na wiedzy [Mikuła, 2018, s. 35-36; Mikuła, 2020, s. 27-29]. Zmiany te stanowią ważną część dalszego rozwoju zarządzania produkcją.

Od powołania do życia ERC i pojawienia się pierwszych publikacji dotyczących rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych mija już przeszło 20 lat. Warto w tym momencie postawić pytanie o to jakie tematy badawcze realizowano w tym okresie i jakie były zastosowania praktyczne koncepcji rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych. Cel badania został zrealizowany poprzez analizę literatury.

1. Istota rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych

Definicja rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego jest następująca: „Rekonfigurowalny system produkcyjny (rsp) jest zaprojektowany od początku dla szybkiej zmiany struktury systemu, zarówno pod względem komponentów sprzętowych jak i oprogramowania, po to by szybko dostosować zdolność produkcyjną i funkcjonalność w obrębie rodziny części, w odpowiedzi na szybkie zmiany na rynku lub wymogi regulacyjne” [Koren i in., 1999, s. 529].

System rsp składa się z: „rekonfigurowalnych maszyn i sterowników, rekonfigurowalnego systemu manipulacji materiałem, metodologii systematycznego projektowania systemu i zmiany zdolności produkcyjnych obejmujących rekonfigurację i rozruch produkcji” [Koren i Galip Ulsoy, United States Patent, nr US 6,349,237 B1]. Maszyny w systemach rsp są zdolne do wykonywania zróżnicowanych procesów na materiałach należących do rodziny części [Koren i Kota, United States Patent, nr 5,943,750]. Komórkowy rekonfigurowalny system produkcyjny to bardziej złożona wielostopniowa (każdy stopień to jakaś faza procesu produkcyjnego) odmiana systemu rsp składająca się z komórek, a każda komórka składa się z przy-

najmniej jednej rekonfigurowalnej maszyny produkcyjnej lub inspekcyjnej. Komórki są połączone przenośnikiem taśmowym. Całość przypomina strukturę plastra miodu [Koren i Hill, United States Patent, US 2004/0255449 A1].

System rsp określają następujące cechy [Koren i in., 2018, s. 123]:

1. Skalowalność – oznaczająca zdolność do zmiany wolumenu produkcji poprzez wymianę elementów systemu lub ich dodawanie albo wycofywanie.
2. Zamiennność – oznaczająca zdolność do zmiany w funkcjonalności systemu lub maszyn, umożliwiającą dostosowanie do aktualnych potrzeb produkcyjnych.
3. Diagnostowalność – oznacza zdolność systemu do monitorowania jakości produktu w czasie rzeczywistym i szybkiej diagnozy przyczyn powstałych wad produktów.
4. Kastomizacja – rozumiana jako ograniczona do danej rodziny produkowanych części elastyczność maszyn i systemu.
5. Modularność – oznacza możliwość przenoszenia elementów systemu służących do wykonania różnych operacji w zależności od planu produkcyjnego.
6. Integralność – to możliwość łatwej integracji modułów systemu poprzez interfejsy zarówno sprzętu jak i oprogramowania.

System rsp pozwala przedsiębiorstwu szybko reagować na zmiany zachodzące na rynku w sposób, który jest racjonalny pod względem kosztów. System ten umożliwia jednocześnie zmianę wielkości i elastyczności produkcji [Azab i Naderi, 2015, s. 77].

Istnieje jeszcze kilka innych typowych dla rsp kwestii. Analizując literaturę przedmiotu Bhatwadekar, Ingale i Dandage wskazali następujące typowe dla rsp cechy [2018, s. 36-39]:

1. Zasady rekonfiguracji:
 - System rsp posiada dodatkowe zasoby produkcyjne na wypadek zmiany uwarunkowań rynkowych lub wewnętrznych samego systemu.
 - System rsp jest zaprojektowany dla danej rodziny produktów, przy takim poziomie elastyczności, który umożliwia produkcję każdego produktu z danej rodziny.
 - Zasady budowy rsp dotyczą zarówno podstawowych jego części jak i całości.
2. Zdolność do wprowadzania zmian w systemie poprzez zmiany w fabryce i procesach, które są podyktowane zmianami ekonomicznymi. Zdolność ta dotyczy elastyczności w produkcji różnych wyrobów, elastyczności operacji i elastyczności wolumenu produkcji.
3. Rekonfigurowalne plany produkcyjne są realizowane i odtwarzane poprzez:

- Wykorzystanie niektórych metod sztucznej inteligencji, które umożliwiają tworzenie konfiguracji systemu na podstawie wstępnych wymagań.
 - Wykorzystanie związków pomiędzy cechami produktu, elementami procesu planowania i wszystkimi modułami systemu.
 - Ekonomicznie racjonalną przebudowę systemu podczas jego rekonfiguracji.
 - Modelowanie zmian na poziomie produktów, technologii, systemów.
 - Wykorzystane baz wiedzy w procesach planowania produkcji i rekonfiguracji systemu.
4. Rekonfigurowalne maszyny złożone z modułów aktywnych (ruchomych) i pasywnych (nieruchomych) – służących do utrzymywania modułów aktywnych w określonym miejscu i pozycji. Moduły te mogą być dodawane, usuwane zastępowane.
 5. Proces planowania dla rekonfigurowalnych maszyn uwzględniający ich dobór oraz możliwe konfiguracje, możliwości produkcyjne i cechy wszystkich produktów należących do danej rodziny.
 6. Każda rodzina produktów wymaga odpowiedniej konfiguracji systemu, dlatego duże znaczenie ma sposób grupowania produktów w rodziny w zależności od wymagań jakie stoją przed systemem dla produkcji każdego z wyrobów.

Duża liczba publikacji dotycząca systemów rsp i rosnące zainteresowanie tym rozwiązaniem doprowadziły do wyodrębnienia się różnych nurtów badawczych.

3. Kierunki badań nad systemami rsp

Rozległe badanie literatury nad systemami rsp przeprowadzili Bortolini, Galizia i Mora, uwzględniając ponad sto pozycji literatury z lat 1999-2017 [2018, s. 95]. W ramach systematycznego przeglądu literatury wyróżnili oni pięć nurtów badawczych nad systemami rsp [Bortolini i in., 2018, s. 95]:

1. Ocena poziomu rekonfigurowalności systemu.
2. Analiza cech systemu rsp (skalowalność, zamienność...).
3. Efekty wykorzystania systemów rsp.
4. Badania stosowane i zastosowania dziedzinowe.
5. Rekonfigurowalność w koncepcji przemysłu 4.0.

Ważną rolę w ocenie systemu rsp odgrywają wskaźniki pomiaru rekonfigurowalności systemu. Dotyczą one poszczególnych cech systemu lub systemu jako całości. W większości przypadków metody oceny systemów rsp oparte są na wielokryterialnych metodach podejmowania decyzji. Polegają one na selekcji kryteriów, ważeniu kryteriów, ewaluacji i końcowej agregacji. Ze względu na przydzielanie

wag dla poszczególnych kryteriów miary tego rodzaju nie mają charakteru uniwersalnego, ale są uzależnione od indywidualnego przypadku. Pomimo prac nad rozwojem miar rekonfigurowalności systemu ciągle trudno znaleźć miary jednocześnie rygorystyczne, wykraczające poza obszar jednej stacji roboczej, odnoszące się i do kwestii zmian w maszynach i złożoności planowania we współczesnych firmach produkcyjnych [Bortolini i in., 2018, s. 96].

Cechy systemu rsp były badane w wielu pracach naukowych. Modularność była rozpatrywana zarówno jako cecha produktu jak i systemu. Modularność produktu polega na zaprojektowaniu standardowych jednostek i wymiarów produktu i późniejszym jego modyfikowaniu dla zapewnienia jego większej elastyczności i różnorodności. Modularność systemu polega na wykorzystaniu wspólnych jednostek dla produkcji różnych wariantów produktu. Zamiennosc jest badana poprzez tworzenie formuł matematycznych dotyczących konfiguracji systemu oraz konfiguracji zamocowania zarówno obrabianych materiałów jak i urządzeń. Badanie kastomizacji jako cechy systemu polega na tworzeniu metryk kastomizacji i projektowaniu systemu rsp dla zapewnienia elastyczności wytwarzania w obrębie rodziny produktów. Skalowalność powinna być brana pod uwagę przy projektowaniu nowego systemu rsp jak i konstrukcji maszyn mających budowę modułową [Bortolini i in., 2018, s. 96-99].

Na początku lat dwutysięcznych rozpoczęły się badania mające na celu analizę skutków wdrażania systemów rsp zarówno na poziomie strategicznym jak i operacyjnym. W ujęciu strategicznym chodzi głównie o decyzje inwestycyjne związane z wyborem rodzaju systemu produkcyjnego. Badania w tym nurcie dotyczą głównie wyboru pomiędzy elastycznym, rekonfigurowalnym albo dedykowanym systemem produkcyjnym. Z badań prowadzonych nad efektami zastosowania systemów rsp wynika również, że rentowność ich stosowania zależy od czasu rekonfiguracji systemu [Bortolini i in., 2018, s. 99].

W perspektywie operacyjnej bada się głównie zdolność systemu do szybkiej reakcji na zmiany zachodzące na rynku, złożoność i niezawodność systemu oraz kwestie związane z jakością. Z badań prowadzonych nad wykorzystaniem systemów rsp wynika, że ich wdrożenie zwiększa zdolność firmy do reagowania na zmiany zachodzące na rynku. Ze względu na szybki postęp technologiczny i duże zróżnicowanie asortymentu produktów i materiałów, zmienność sytuacji na rynkach prowadzi do wzrostu złożoności systemów produkcyjnych zarówno w aspekcie strukturalnym jak i dynamicznym. Z tego względu badano również stopień złożoności systemów rsp z wykorzystaniem zróżnicowanych metod. Jakość produkcji jest szczególnie ważnym zagadnieniem zarządzania operacyjnego. W aspekcie jakości produktów analizowane były kryteria brane pod uwagę przy projektowaniu systemów rsp i ocenie

ich wyposażenia, konfiguracji, jak również wpływ zastąpienia pracy ludzkiej pracą maszyn, które w przeciwieństwie do ludzi nie popełniają błędów. Oprócz jakości produktu w perspektywie operacyjnej ważną rolę odgrywa niezawodność systemu, rozumiana jako możliwość poprawnego działania przez określony czas. W badaniach naukowych brano pod uwagę niezawodność systemu rsp w modelach służących do wyboru optymalnej konfiguracji systemu rsp. W literaturze poświęconej systemom rsp bierze się również pod uwagę kwestie ich ekologicznego, społecznego i ekonomicznego zrównoważenia [Bortolini i in., 2018, s. 99-100].

Badania stosowane i zastosowania dziedzinowe dotyczące systemów rsp dotyczą takich zagadnień jak wbudowane rekonfigurowalne systemy transportowe, projektowanie układu przestrzennego, zagadnienie określenia rodziny produktów, rozwój komórkowych rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych, wybór właściwej konfiguracji systemu, planowanie w systemach rsp. Jednym z ważniejszych zastosowań koncepcji rekonfigurowalności systemu są zbudowane z modułów wbudowane systemy transportowe. Opracowywano m.in. specjalny algorytm do zarządzania przepływem części przez system oraz model do oceny niezawodności systemu transportowego w rsp. Projektowanie układu przestrzennego systemu rsp dla danej rodziny produktów również doczekało się opracowań zawierających modele optymalizacji rozmieszczenia urządzeń, w szczególności urządzeń transportowych jak roboty przemysłowe, automatyczne urządzenia transportowe (AGV). Typowym zagadnieniem dla systemów rsp jest grupowanie produktów w rodziny. Rodziny produktów są tworzone na bazie podobieństwa operacji jakim poddawane są części z jakich są wyprodukowane lub podobieństwa sekwencji operacji. Do grupowania produktów w rodziny wykorzystywana jest niewielka liczba metod. Są to analiza skupień i metody wielokryterialnego podejmowania decyzji jak AHP. Wybór właściwej konfiguracji systemu jest kluczowym działaniem w obszarze zarządzania systemami rsp. Obejmuje zarówno rozplanowanie maszyn, wybór wyposażenia, jak i przydzielanie zadań. W tej dziedzinie prace naukowe zawierają modele optymalizacyjne, meta-heurystyczne i wielokryterialnego podejmowania decyzji. Ze względu na dynamiczne zmiany jakie zachodzą na rynku produktów i skracanie się cyklu życia produktów ważnym zagadnieniem stało się zarządzanie i projektowanie komórkowych, rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych. Każda komórka składa się z maszyn o budowie modułowej (modułów podstawowych i pomocniczych) i może realizować różne zadania przy zmiennym horyzoncie planowania. Do zarządzania tego typu systemem wykorzystuje się modele matematyczne. Ważnym zagadnieniem praktycznym w tematyce systemów rsp jest harmonogramowanie i planowanie produkcji. Harmonogramowanie produkcji w systemie rsp obejmuje ustalenie se-

kwencji obrabianych elementów w systemie, dobór maszyn do operacji, dobór sekwencji obrabianych elementów do danej maszyny. Planowanie produkcji w systemach rsp polega na opracowaniu modeli służących opracowaniu optymalnej sekwencji zadań produkcyjnych i odpowiadających im konfiguracji maszyn produkcyjnych oraz rozmiarów partii produkcyjnych. Ze względu na złożoną naturę procesu planowania w systemach rsp tworzone są również modele jego optymalizacji [Bortolini i in., 2018, s. 100-103].

Rekonfigurowalność zajmuje również ważne miejsce w koncepcji przemysłu 4.0. Systemy rsp jako zaawansowane rozwiązanie produkcyjne są jedną z dziewięciu technologii umożliwiających tzw. cyfrową produkcję. Modularność, zmienność, wysoka elastyczność, wykorzystanie czujników to cechy systemów rsp odpowiadające wytycznym koncepcji przemysłu 4.0. Szczególnie interesująca w perspektywie koncepcji przemysłu 4.0 wydaje się koncepcja hybrydowych rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych w których zadania są podzielone pomiędzy ludzi i roboty. Ze względu na nowość i rosnącą liczbę publikacji dotyczących przemysłu 4.0 należy spodziewać się kolejnych opracowań dotyczących zastosowania systemów rsp w kontekście czwartej rewolucji przemysłowej [Bortolini i in., 2018, s. 103].

Z badań przeprowadzonych przez pracowników Uniwersytetu Michigan wynika, że systemy rsp będą następnym etapem rozwoju systemów produkcyjnych po elastycznych systemach produkcyjnych. Do technologii, które umożliwią ich dalszy rozwój należą: maszyny o dużej szybkości działania, maszyny o budowie modułowej, sterowniki o otwartej architekturze [Mehrabi i in., 2002, s. 144].

4. Implementacja systemu rsp

Wdrożenie systemu rsp wymaga zastosowania odpowiedniej procedury projektowania. Jedną z nich opracowali sami twórcy koncepcji systemu rsp pracownicy Uniwersytetu w Michigan. Podzielili oni procedurę projektowania systemu na dwa etapy tj. projektowanie systemu jako całości oraz projektowanie maszyn. Na samym początku jednak wskazali na konieczność analizy cyklu życia produktu pod kątem zasadności wyboru systemu rsp, jako właściwego do jego produkcji [Koren i Galip Ulsoy, United States Patent, nr US 6,349,237 B1]. Dobrze zaprojektowany z punktu widzenia cyklu życia produktu system rsp daje możliwość dysponowania taką funkcjonalnością i możliwościami produkcyjnymi jakie w danym momencie są rzeczywiście potrzebne. Jednak przewidzenie tego jaki w przyszłości będzie popyt na poszczególne produkty jest trudne. Samo projektowanie systemu rsp jest zadaniem złożonym ze względu na dużą liczbę potencjalnych konfiguracji systemu w ciągu jego cyklu życia. Przy projektowaniu systemu należy uwzględnić wiele kryteriów

jak koszty, jakość produktu i zdolność do reagowania na zmiany zachodzące na rynku. Z tego względu wykorzystuje się w projektowaniu systemu metody analizy wielokryterialnej [Koren i in., 1999, s. 532]. W tym miejscu należy podkreślić, że systemy rsp nie są jedynym sposobem na zwiększenie elastyczności produkcji. Podstawowym rozwiązaniem w tym zakresie są elastyczne systemy produkcyjne lub rozwiązania hybrydowe, polegające na połączeniu elastycznego i dedykowanego systemu produkcyjnego. Abdi i Labib [2003, s. 2287-2294] wykorzystali metodę AHP do wyboru systemu produkcyjnego będącego odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie w zakresie elastyczności produkcji firmy motoryzacyjnej Arvin Meritor. Dotychczasowa produkcja w firmie była oparta na dedykowanych liniach produkcyjnych, jednak zauważono potrzebę zwiększenia zdolności firmy do reagowania na zmiany jakie zachodziły na rynku. Jako alternatywę dla istniejącego systemu przyjęto system rsp oraz system hybrydowy. W badaniu wzięło udział trzech menedżerów firmy. W modelu jaki zaproponowali Abdi i Labib [2003, s. 2285] wyróżnia się trzy horyzonty planowania krótki-, średnio- i długoterminowy. W tym przypadku wyróżniono tylko horyzont krótko i długoterminowy. Zaproponowany model oceny systemu produkcyjnego obejmuje takie cele jak: responsywność, koszty produkcji, jakość produktu, zapasy, umiejętności operatorów. W analizowanym przypadku najwyższy priorytet uzyskał system hybrydowy, dalej system rsp a potem istniejący w firmie dedykowany system produkcyjny. Priorytety wyniosły odpowiednio 0,372; 0,353 i 0,275 – co oznacza, że zdaniem menedżerów pozostanie przy samym tylko dedykowanym systemie produkcyjnym jest niewłaściwe, ale rozwiązanie hybrydowe jest nieco lepsze od systemu rsp. Zastosowanie hybrydowego lub rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego jest szczególnie ważne w długim okresie czasu. Przy czym co ważne kierownictwo firmy chce zachować większość dotychczasowych linii produkcyjnych dla istniejących produktów, ale dopuszcza zastosowanie systemu rsp dla nowych produktów. Ważnym celem w decyzji o wyborze systemu produkcyjnego stała się responsywność systemu. Pod tym względem lepszym rozwiązaniem jest system rsp. Podsumowując rekomendowane rozwiązanie dla firmy Arvin Meritor uzależnione było od horyzontu planowania. W bieżącym okresie firma powinna być pozostać przy dotychczasowym systemie produkcyjnym, w krótkim okresie powinna być dokonać zmiany w kierunku systemu hybrydowego, a w długim okresie czasu powinna wdrożyć system rsp [Abdi i Labib, 2003, s. 2293].

Przy podejmowaniu decyzji o zmianie systemu produkcyjnego z dotychczasowego na rekonfigurowalny można również dokonać analizy cech procesów produkcyjnych pod kątem zakresu dostosowania ich do cech typowych dla systemów rsp. Taką analizę przeprowadzono w firmie LEGO Group. W produkcji klocków wykorzystywane są cztery procesy: formowania, dekoracji, montażu i pakowania. Tylko

niektóre z procesów formowania mają budowę modułową. Do produkcji zróżnicowanych elementów klocków LEGO wykorzystywanych jest wiele różnych maszyn. Niestety czas rozruchu nowej produkcji jest duży. Na rozruch nowej produkcji składają się takie procesy jak zmiany mechaniczne, materiału, barwy i próbny rozruch. Jeśli byłoby możliwe ograniczenie czasu rozruchu nowej produkcji, to zwiększyłoby to produktywność firmy. Niestety maszyny używane w procesie formowania są drogie, a ich zakup obejmuje znaczną część nakładów inwestycyjnych. Proces dekorowania nie jest typowym procesem dedykowanym i możliwe są w nim pewne zmiany, natomiast są one ograniczone tylko do poszczególnych dekoracji (wyglądu), ale gdy jest potrzebna zmiana kształtu danego elementu (zmiany geometryczne) jest już potrzebna inna maszyna. Ustawienie maszyn dla danego produktu jest typowo dedykowane i zautomatyzowane. Jeśli chodzi o proces montażu to LEGO Group ma jedną fabrykę dedykowaną tylko do procesów łączenia niewielkich elementów i drugą fabrykę, w której procesy montażu mają charakter modułowy i można w niej wyszczególnić różne funkcjonalności. Można również dodawać różne moduły dla poszczególnych funkcjonalności i w ten sposób zwiększać zdolności produkcyjne, a rozruch nie jest zbyt długi. Możliwość dokonywania zmian w procesie pakowania jest uzależniona od rozmiarów produktów. Klocki serii DUPLO muszą być pakowane w innych maszynach. Poza tym można łatwo zmieniać asortymenty pakowanych produktów zmieniając produkt wprowadzany do maszyn pakujących lub wykorzystując częściowo prace ręczne. W wyniku przeprowadzonej analizy okazało się, że najwięcej cech rekonfigurowalności mają procesy montażu i formowania, a w najmniejszym stopniu spełnia je proces dekorowania. Spośród cech systemu rsp w badanych procesach nie była w ogóle wykorzystywana diagnozowalność systemu zatem jest to główny obszar, w którym system rsp może istotnie różnić się od istniejących w firmie rozwiązań [Wang i in. 2012, s. 4-5, 7].

Projektowanie systemu rsp wymaga systematycznego działania i wsparcia odpowiednim systemem podejmowania decyzji. Polega na dobraniu modułów poszczególnych urządzeń do cech geometrycznych i tolerancji obróbki dla poszczególnych części. Dobór urządzeń wymaga analizy potrzeb użytkownika systemu takich jak wolumen, cechy produktu i asortyment. Na tej podstawie wybiera się poszczególne operacje jakim mają zostać poddane poszczególne elementy. Ważnym zagadnieniem projektowania systemu produkcyjnego jest jego organizacja przestrzenna. Możliwe układy to szeregowe, równoległe oraz hybrydowe łączenie stanowisk oraz ich kombinacje. Czynniki jakie należy uwzględnić przy decydowaniu o rozmieszczeniu stanowisk to jakość produkcji, produktywność systemu, możliwość zwiększenia zdolności produkcyjnych systemu, jego niezawodność i koszty. Duża ilość możliwych konfiguracji systemu może zostać ograniczona dzięki projektowaniu

systemu zgodnie z wymaganiami dla danej rodziny produktów. Następnie należy rozdzielić operacje pomiędzy poszczególne urządzenia w zrównoważony sposób oraz zaprojektować subsystemy transportu i komunikacji. Ostatnim etapem projektowania powinna być analiza kosztów w całym cyklu życia systemu, przy uwzględnieniu przyszłych zmian w asortymencie produktów i niepewności co do sytuacji na rynku. Drugi etap projektowania systemu rsp to projektowanie maszyn w taki sposób by ich rekonfiguracja była niedroga i umożliwiała szybki rozruch produkcji. Wszystkie elementy maszyn oraz sterowniki powinny zostać skatalogowane co ma ułatwić ich powtórne wykorzystanie. W projektowaniu maszyn należy wykorzystać specjalistyczne oprogramowanie by określić sekwencje realizowanych operacji oraz parametry procesów technologicznych. Oprogramowanie wykorzystywane w projektowaniu maszyn generuje wszystkie możliwe konfiguracje, natomiast oprogramowanie wykorzystywane w projektowaniu systemu jako całości dokonuje wyboru tych z spośród nich, które są optymalne [Koren i Galip Ulsoy, United States Patent, nr US 6,349,237 B1].

System rsp został wdrożony m. in. w fabryce silników Forda w Windsor w Kanadzie. Złożony jest ze 120 obrabiarek CNC, pogrupowanych w 20 stopni po 6 maszyn. Każda maszyna na poziomie systemu jest modułem tzn. jej funkcja może zostać zmieniona, jeśli w systemie będzie musiała być produkowana nowa rodzina części [Koren i in., 2018, s. 125]. Realizowano również szereg prac badawczych polegających na planowaniu i projektowaniu oraz tworzeniu modeli symulacyjnych systemów rsp m. in. w zakresie spawania zrobotyzowanego elementów karoserii samochodowych [Al-Zaher, 2013, s. 108], produkcji sądy pomiarowej 3D [Puik, 2017, s. 181-187], planowania produkcji w ramach systemu rsp [Gola, 2019, s. 92-100; Hees i in., 2017, s. 185; Micieta i in., 2015, s. 545].

Przykładem rekonfigurowalnej obrabiarki mogą być maszyny produkowane przez firmę Plot Electronics. Obrabiarki CNC serii Sentinel N mają możliwość rozbudowy z obrabiarki 3-osiowej do 5-osiowej. W zależności od konfiguracji może być maszyną bigującą, frezującą, tnącą, służącą do nakładania, grawerowania, skanowania lub tłoczenia. Firma udostępnia też własne oprogramowanie CAD/CAM [<https://obrabiarki-cnc.pl/oferta/1-obrabiarki-cnc-seria-sentinel-n>, 11.09.2020]. Innym przykładem może być wykorzystanie rekonfigurowalnej obrabiarki do procesów szlifowania i polerowania elementów ceramicznych [Shneor, 2018, s. 225-226].

Podsumowanie

Zastosowanie systemów rsp daje przedsiębiorstwom produkcyjnym nowe szerokie możliwości wytwarzania zróżnicowanych produktów i zaspokajania zmiennego popytu. Zatem nie tylko zróżnicowany asortyment produktów, ale jednocześnie zmienny wolumen produkcji są obecnie największym wyzwaniem dla zarządzających produkcją. Koncepcja systemu, który jest jednocześnie elastyczny i skalowalny w takich warunkach jest najlepszym rozwiązaniem. Jednak należy się jednocześnie liczyć z tym, że system rsp jest wewnętrznie złożony, jego zaprojektowanie i rekonfiguracja wymaga pracy wysoko wykwalifikowanych inżynierów. Stąd najprawdopodobniej w wielu firmach częstszym rozwiązaniem pozostanie system hybrydowy jako połączenie elastycznego i dedykowanego systemu produkcyjnego, który jest rozwiązaniem mniej kosztownym i łatwiejszym do wdrożenia oraz eksploatacji.

System rsp stał się szczególnie interesującym zagadnieniem dla środowisk naukowych. Wpisuje się on w koncepcje nowoczesnych technologii produkcyjnych i rewolucyjnych zmian w przemyśle zachodzących na przełomie XX i XXI wieku. Jednocześnie wiele badań prowadzonych jest z wykorzystaniem modeli symulacyjnych i nie wiążą się one z ograniczeniami finansowymi typowymi dla praktyki biznesu. Nowoczesne oprogramowanie pozwala na projektowanie systemów produkcyjnych i symulację efektów ich działania. Stąd liczne publikacje dotyczące problematyki systemów rsp i wiele nurtów badawczych, wśród których w przyszłości będą pojawiać się nowe. Złożoność systemu rsp, która może sprawiać trudności w praktyce w nauce może okazać się siłą napędową, zachęcającą naukowców do poszukiwań nowych tematów badawczych w zakresie systemów rsp.

Literatura

1. Abdi M.R., Labib A.W. (2003), *A design strategy for reconfigurable manufacturing systems (RMSs) using analytical hierarchical process (AHP): A case study*, International Journal of Production Research, 41 (10), pp. 2273-2299
2. Al-Zaher A. (2012), *Cost-effective Design of Automotive Framing Systems Using Flexibility and Reconfigurability Principles*, Dissertation, University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada
3. Azab A., Naderi B. (2015), *Modelling the problem of production scheduling for reconfigurable manufacturing systems*, Procedia CIRP, 33, pp. 76-80
4. Bhatwadekar S.G., Ingale S.M., Dandage R.V., (2018), *Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS): A Literature Review*, International Journal for Research in Engineering

- Application & Management (IJREAM), Special Issue – CTRD, 3rd National Conference on "Changing Technology and Rural Development", Dec 2018, Organized by Rajendra Mane College of Engineering & Technology, Ambav, India, pp. 35-39
5. Bortolini M., Galizia F.G., Mora C. (2018), *Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend*, Journal of Manufacturing Systems, October, pp. 93-106
 6. Gola A. (2014), *Procesy produkcji w zautomatyzowanych procesach produkcyjnych*, [w:] Szatkowski K. (red.), *Nowoczesne zarządzanie produkcją – ujęcie procesowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, s. 170-225
 7. Gola A. (2019), *Reliability analysis of reconfigurable manufacturing system structures using computer simulation methods*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 21 (1), pp. 92-100
 8. Gola A., Świć A., (2016), *Actual Trends in Manufacturing Systems Development*, Technological Complexes, 1 (13), pp. 14-23
 9. Hees A., Bayerl Ch., Van Vuuren B., Schutte C.S.L., Braunreuther S., Reinhart G., (2017), *A production planning method to optimally exploit the potential of reconfigurable manufacturing systems*, Procedia CIRP, 62, pp. 181-186
 10. <https://obrabiarki-cnc.pl/oferta/1-obrabiarki-cnc-seria-sentinel-n> [11.09.2020]
 11. Koren Y., Kota S., United States Patent, nr 5,943,750, z dnia 31 sierpnia 1999 r.
 12. Koren Y., Galip Ulsoy A., United States Patent, nr US 6,349,237 B1, z dnia 19 lutego 2002 r.
 13. Koren Y., Gu X., Guo W., (2018), *Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends*, Frontiers of Mechanical Engineering 13 (2), pp. 121-136
 14. Koren Y., Heisel U., Jovane F., Moriwaki T., Pritschow G., Ulsoy G., Van Brussel H. (1999), *Reconfigurable manufacturing systems*, Annals of the CIRP, 48 (2), pp. 527-540
 15. Koren Y., Hill R.L., United States Patent, US 2004/0255449 A1, z dnia 23 grudnia 2004 r.
 16. Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y., (2000), *Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing*, Journal of Intelligent Manufacturing 11, pp. 403-419
 17. Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y., Heytler P., (2002), *Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems*, Journal of Intelligent Manufacturing, 13, pp. 135-146
 18. Micieta B., Binasova V., Haluska M. (2015), *System for support the design and optimization of reconfigurable manufacturing systems*, MM Science Journal, March, pp. 542-546
 19. Mięka B. (2018), *Zarządzanie oparte na wiedzy – podstawowe założenia*, Studia Ekonomiczne, Gospodarka, Społeczeństwo, Środowisko, 1 (2), ss. 34-46

20. Mikula B. (2020), *Rewolucja w przedsiębiorstwach: od zarządzania zasobem ludzkim i zarządzania wiedzą do zarządzania kapitałem ludzkim*, Akademia Zarządzania, 4 (2), s. 27-45
21. Puik E. (2017), *Risk Adjusted, Concurrent Development of Microsystems and Reconfigurable Manufacturing Systems*, A thesis, Warwick Manufacturing Group, University of Warwick, Supported by the HU University of Applied Sciences Utrecht, November
22. Shneor Y. (2018), *Reconfigurable machine tool: CNC machine for milling, grinding and polishing*, Procedia Manufacturing, 21, pp. 221-227
23. Wang Y., Bilberg A., & Hadar R. (2012), *Implementation of Reconfigurable Manufacturing Systems, the Case of The LEGO Group*. Paper presented at 4th World Conference on Production & Operations Management / 19th International Annual EurOMA Conference Amsterdam, Amsterdam, Netherlands, (Submitted manuscript), pp. 1-9

Reconfigurable manufacturing systems – research directions and applications

Abstract

The article presents the issue of reconfigurable manufacturing systems in the aspect of research conducted so far and practical applications. It presents the definition of reconfigurable manufacturing systems and changes in economy and production which are the main reason for their development. In the next part of the article particular directions of research are discussed such as: system reconfigurability, its features, results of application, applied research and possibility of application in the perspective of industry 4.0. Then the procedure of designing reconfigurable manufacturing systems and selected applications are discussed.

Keywords

production management, reconfigurable manufacturing systems, flexible manufacturing systems