

UDC 111.11

Gola A., Dr inż., Świć A., Prof. dr hab. inż.

Lublin University of Technology / Poland

## ACTUAL TRENDS IN MANUFACTURING SYSTEMS DEVELOPMENT

### AKTUALNE KIERUNKI ROZWOJU SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

**Abstract:** *The growing instability of the business arena, advancements of the information and communication technologies, and increased competition determined manufacturing enterprises to change their way of pursuing business. As consequence, new paradigms for manufacturing engineering systems have emerged.*

*One of the key factors, which determined the level of competitiveness of manufacturing plants in every moment in history was the ability to flexible production of goods compatible with the requirements of customers. During the last century it can be noticed both moments when flexibility was completely inessential, and these one when skills for rapid adaption to changeable requirements of customers decided not only about the level of competitiveness and possibility of companies development but was a critical determinant of surviving on the market.*

*The aim of this article is to present actual trends in manufacturing systems design and development. In particular, craft manufacturing, dedicated manufacturing systems (DMS) and flexible manufacturing systems (FMS) were characterized. Finally, actual problems and trends in production system design were noticed and probable directions of development of manufacturing systems in 21<sup>st</sup> century were indicated.*

**Keywords:** *production, manufacturing systems, FMS, reconfigurable manufacturing system, focused flexibility manufacturing systems*

#### INTRODUCTION

The 20<sup>th</sup> century was a period of continuous challenges that both production companies and designers of manufacturing systems had to stand up to these. It was a result of technical and technological progress unknown in history so far, process of globalization moving forward in frantic pace, increasing level of competition, and also changeable and more and more superior requirements of customers. The same, both methods of production and organization of manufacturing systems were a subject of constant evolution.

One of the key factors, which determined the level of competitiveness of manufacturing plants in every moment in history was the ability to flexible production of goods compatible with the requirements of customers. During the last century it can be noticed both moments when flexibility was completely inessential, and these one when skills for rapid adaption to changeable requirements of customers decided not only about the level of competitiveness and possibility of companies development but was a critical

**Streszczenie:** *Ciągle rosnąca niestabilność na arenie biznesowej, rozwój zaawansowanych technologii informacyjnych oraz komunikacyjnych, a także wzrastający poziom konkurencyjności zmuszają przedsiębiorstwa do ciągłych zmian w zakresie prowadzonej działalności. W konsekwencji pojawiają się nowe paradygmaty w obszarze inżynierii systemów produkcyjnych.*

*Jednym z kluczowych czynników, decydujących o poziomie konkurencyjności przedsiębiorstw produkcyjnych pozostaje zdolność do elastycznej produkcji wyrobów zgodnej z wymaganiami klientów. W okresie ostatniego wieku można zauważyć okresy, w których elastyczność była traktowana zarówno jako mało istotna, jak również jako podstawowy element decydujący o umiejętności dostosowania się do zmiennych wymagań klientów, a w konsekwencji do pozostania konkurencyjnym na rynku, rozwoju firmy - a czasami wręcz jako determinanta przetrwania na rynku. Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie aktualnych trendów w obszarze projektowania i rozwoju systemów produkcyjnych. W szczególności scharakteryzowane zostały systemy oparte na pracy rzemieślniczej, systemy dedykowane oraz elastyczne systemy produkcyjne. Ponadto przedstawione zostały aktualne problemy i trendy w projektowaniu systemów produkcyjnych oraz możliwe kierunki rozwoju systemów wytwarzania w 21 wieku.*

**Słowa kluczowe:** *wytwarzanie, systemy produkcyjne, ESP, rekonfigurowalne systemy produkcyjne, dedykowane elastyczne systemy produkcyjne*

#### WPROWADZENIE

Wiek XX-ty był okresem nieustających wyzwań, którym czoło musieli stawić zarówno przedsiębiorstwa produkcyjne, jak również projektanci systemów wytwórczych. Wyzwania te były rezultatem niespotykanej w historii rozwoju globalizacji, rosnącego poziomu konkurencji oraz zmieniających się i ciągle rosnących wymagań klientów. Jednocześnie przedmiotem rozwoju były również techniki wytwarzania oraz metody organizacji systemów produkcyjnych.

Jednym z kluczowych czynników determinujących poziom konkurencyjności przedsiębiorstw produkcyjnych, w każdym momencie była zdolność elastycznego wytwarzania produktów zgodnego z zapotrzebowaniem klientów. W okresie ostatniego wieku zauważyć można zarówno okresy, kiedy elastyczność traktowana była jako zupełnie nieistotna, jak również takie, kiedy zdolność do szybkiego dostosowania się do zmiennych potrzeb klientów odbierana była jako czynnik decydujący o poziomie konkurencyjności i możliwości rozwoju przedsiębiorstw, a także jako determinanta przetrwania przedsiębiorstw na rynku.

determinant of surviving on the market.

In the 21st century manufacturing companies face increasingly frequent and unpredictable market changes driven by global competition, including the rapid introduction of new products and constantly varying product demand [1]. To remain competitive, companies must design manufacturing systems that not only produce high-quality products at low costs, but also allow for rapid response to market changes and consumer needs [2].

This article presents main stages of development of production methods and manufacturing systems. Especially, the element of flexibility was analyzed as a determinant of designing and developing the manufacturing systems. Finally, the new directions of development of manufacturing systems were presented and some problems which have to be taken into account in these new concepts were indicated.

### CRAFT MANUFACTURING

Until the 20<sup>th</sup> century the craft manufacturing was the only method of producing goods. This type of production is not important from the manufacturing system's design point of view (in craft manufacturing it is difficult to discuss about manufacturing systems) but it is very interesting when focus on the task of flexibility. Craftsmen used high skilled workers and simply but flexible tools to produce goods precisely desired by customer. Most often it was an unique product. An example products are: furniture made against specific order, decoration elements or sport cars. Generally, even now people like the idea of craft manufacturing, but this method of production is connected with one obvious problem: goods made by craftsmen are rather exclusive goods and for most people these are too expensive [3].

When focus on the problem, it is possible to distinguish some basic features of craft manufacturing:

- Workers (craftsmen) are highly qualified in design, machine and assembly tasks (more of the workers to get craft skills learnt by practice working in craft companies).
- Craft companies were deeply decentralized but located near big cities. More of produced parts were manufactured in small workshops.
- The production was coordinated by the owner of craft company who was responsible for direct contacts with customers, workers, suppliers etc.
- The machine tools for drilling, turning or other mechanical operations performed on metal or wooden parts were very universal.
- The volumes of production were very small (in case of car production 1000 or less cars were produced annually).
- All of the products (even made using the same project) were different because craft methods moved high variability.

So, when summarize the characteristics of craft manufacturing it can be concluded that this method was in other hand very flexible, but on the other hand very expensive.

W XXI wieku przedsiębiorstwa produkcyjne muszą stawić czoła częstym i nieprzewidywalnym zmianom rynkowym, będąc rezultatem konkurencji o charakterze globalnym, włączając w to zarówno szybkie i częste wprowadzanie nowych produktów, jak też ciągle zmienny popyt na produkty [1]. Aby pozostać konkurencyjnym, przedsiębiorstwa muszą projektować systemy wytwórcze, które umożliwią nie tylko produkcję wysokojakościowych wyrobów przy niskich kosztach, ale również stawić czoła szybkim zmianom potrzeb rynkowych i potrzeb konsumentów [2].

W niniejszym artykule zaprezentowano główne etapy rozwoju metod produkcji i projektowania systemów produkcyjnych. W sposób szczególny pod uwagę wzięto czynnik elastyczności, jako kluczową cechę systemów wytwórczych. Ponadto, zostały zaprezentowane nowe kierunki rozwoju systemów produkcyjnych oraz wybrane problemy związane z niniejszymi formami wytwarzania.

### PRACA RZEMIEŚNICZA

Do początku XX wieku praca rzemieślnicza była jedyną formą realizacji procesu produkcji. Ten typ produkcji nie jest istotny z punktu widzenia problematyki projektowania systemów produkcyjnych (w przypadku pracy rzemieślniczej trudno jest bowiem mówić o systemie produkcyjnym) ale jest bardzo istotnym czynnikiem z punktu widzenia analizy elastyczności procesu. Pracownia rzemieślnicza oparta była na wysokowyzwalających pracownikach i prostych ale esastycznych narzędziach, co umożliwiała produkcję unikalnych wyrobów zgodną ściśle z potrzebami klientów. Przykładami mogą tu być meble wytwarzane na specjalne zamówienie, elementy dekoracji czy samochody. Ta forma wytwarzania jest akceptowana również dzisiaj - jest ona jednak utożsamiana z produkcją dóbr ekskluzywnych, które dla większości ludzi są zbyt drogie [3].

Szczegółowa analiza problemu pozwala wyróżnić następujące cechy pracy rzemieślniczej:

- Pracownicy (rzemieślnicy) posiadają wysokie kwalifikacje zarówno w zakresie zadań produkcyjnych, jak też montażowych (większość pracowników uzyskiwała kwalifikacje pracując w przedsiębiorstwach opartych o pracę rzemieślniczą),
- Przedsiębiorstwa wykorzystujące pracę rzemieślniczą były głęboko zdecentralizowane, ale zlokalizowane w pobliżu dużych miast. Większość produkowanych wyrobów było produkowane w małych zakładach produkcyjnych.
- Produkcja była koordynowana przez właściciela przedsiębiorstwa, który był odpowiedzialny za bezpośrednie kontakty z klientami, pracownikami, dostawcami, itd.,
- Maszyny do wiercenia, toczenia i innych operacji mechanicznych były bardzo uniwersalne,
- Wielkość produkcji była bardzo niewielka (w przypadku samochodów produkowano około 1000 sztuk lub mniej),
- Wszystkie produkty (nawet wytwarzane w oparciu o ten sam projekt) były inne - pracę rzemieślniczą cechuje bowiem duża zmienność i niepowtarzalność.

Podsumowując krótko pracę rzemieślniczą należy stwierdzić, iż charakteryzowała się ona wysokim poziomem elastyczności ale też wysokimi kosztami wytwarzania.

## DEDICATED MANUFACTURING SYSTEMS (DMSs)

In the 1900s the way of production had dramatically changed. The main reason was implementation by Henry Ford system of mass production and dedicated manufacturing lines. In 1907 the Model T was born. The launch marked one of the first instances where a large number of accurately machined mechanical components were combined to form a product. The product was sufficiently inexpensive to purchase that it sold in significant volumes (for that time). Indeed, during the sixteen-year life of Model T, over 19 million vehicles were sold. At the height of production, over a million cars were being manufactured each year. But, of course, the Model T, perhaps unjustifiably, gained a certain amount of notoriety, because at one stage Henry Ford was supposed to have said about his brainchild "you can have any colour, so long as it's black" [3]. What this meant was, that everyone could obtain the product, relatively cheaply, but there was no variety.

The conception of mass production introduced by Henry Ford, contributes to development of dedicated manufacturing systems which generally appear in two forms [4]:

- Continuous manufacturing systems.
  - Intermittent manufacturing systems
- which can be further divided into specific form of manufacturing systems (fig.1).

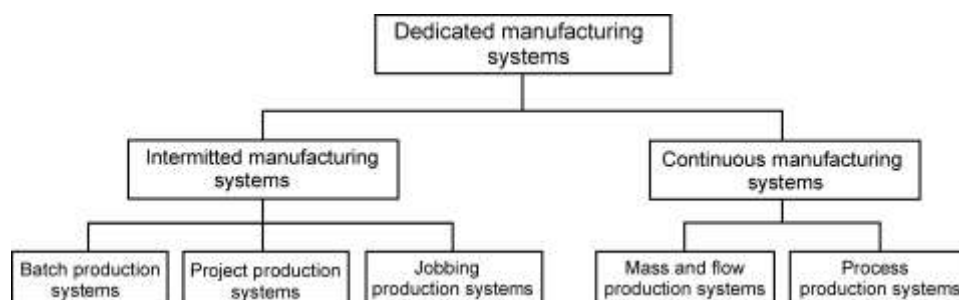


Fig. 1 - Classification of dedicated manufacturing systems / *Klasyfikacja dedykowanych systemów produkcyjnych*

When analyze the flexibility level of dedicated manufacturing systems, it is worth to notice that continuous manufacturing systems are typically rigid where the level of flexibility is around "zero". The intermittent systems, where the need of flexibility has been already noticed, are designed as a "customer focused", taking into account the problem of variation and changeability of customers' orders.

## FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS (FMSs)

In the middle of the 1960s, market competition became more intense and more complex. With significantly shortened product life cycles, manufacturers found that they can no longer capture market share and gain higher profits by producing large volumes of standard products for a mass market. Success in manufacturing required the adoption of methods of production that can provide a fast and flexible response to unanticipated changes. Many companies were confronted with the challenge of changing their manufacturing orientations to meet demands of current

## DEDYKOWANE SYSTEMY PRODUKCYJNE

W latach 90. XX wieku sposób wytwarzania uległ radykalnej zmianie. Głównym powodem było wprowadzenie przez Henry'ego Forda systemu produkcji masowej i ruchomej linii monażowej. W 1907 roku powstał Model T, który rozpoczął rewolucję w sposobie wytwarzania, w którym produkt powstawał poprzez połączenie dużej liczby części wykonanych z dużą dokładnością i powtarzalnością. Sprawilo to, że wyrób był wystarczająco tani i mógł być produkowany (jak na tamte czasy) w olbrzymich ilościach. W ciągu 16 lat sprzedano bowiem ponad 19 milionów samochodów - co oznacza, iż każdego roku produkowano ponad milion samochodów. Jednakże Model T, być może niesłusznie, zyskał miano monotonnego - a to za sprawą Henry'ego Forda, który na jednym z wystąpień miał powiedzieć o swoim produkcie, iż "może on być wyprodukowany w jakimkolwiek kolorze, pod warunkiem, że jest to kolor czarny" [3]. Oznaczało to, iż każdy mógł nabyć taki produkt relatywnie tanio, ale nie było żadnego zróżnicowania.

Koncepcja produkcji masowej zapoczątkowana przez Henry'ego Forda przyczyniła się do powstania dedykowanych systemów produkcyjnych, które istnieją w dwóch formach [4]:

- Systemy produkcji ciągłej,
- Systemy produkcji gniazdowej.

które dalej mogą zostać podzielone na bardziej szczegółowe formy systemów produkcyjnych (rys. 1).

Dokonując analizy elastyczności dedykowanych systemów produkcyjnych, warto jest wspomnieć, iż systemy produkcji ciągłej są systemami "sztywnymi" co oznacza, że poziom ich elastyczności jest bliski zeru. W systemach produkcji gniazdowej problem elastyczności został już zauważony i były one projektowane jako "zorientowane na klienta" uwzględniając problem wahań i zmienności zapotrzebowania klientów.

## ELASTYCZNE SYSTEMY PRODUKCYJNE (ESP)

W połowie lat 60. XX wieku konkurencja na rynku stała się bardziej intensywna i złożona. Przy znacznie skracających się cyklach życia produktu, wytwórcy zrozumieli, iż utrzymanie pozycji rynkowej oraz uzyskiwanie wysokich zysków przy produkcji produktów standardowych w systemie produkcji masowej nie jest już możliwe. Sukces w procesie wytwarzania mogło przynieść tylko zastosowanie metod produkcji, które umożliwiają szybką i elastyczną odpowiedź na nieprzewidywalne zmiany na rynku. Wiele przedsiębiorstw stanęło przed wyzwaniem zmiany sposobu wytwarzania w sposób umożliwiający odpowiedź na wyzwania pojawiające

market place. As a solution to this challenge, the idea of Flexible Manufacturing System (FMS) was proposed [4].

A Flexible Manufacturing System (FMS) is a group of numerically-controlled machine tools, interconnected by a central control system. The various machining cells are interconnected, via loading and unloading stations, by an automated transport system (Fig. 2). Operational flexibility is enhanced by the ability to execute all manufacturing tasks on numerous product designs in small quantities and with faster delivery [5]. It has been described as an automated job shop and as a miniature automated factory. In other words, it is an automated production system that produces one or more families of parts in a flexible manner [6].



Fig. 2 - An example of flexible manufacturing system / *Przykład elastycznego systemu produkcyjnego* [7]

FMSs are still oriented to produce a large variety of parts in small quantities and they are conceived to react to most of the possible products changes. Unfortunately the cost of investment to acquire an FMS is very high and it considerably affects the cost to produce a part; indeed its flexibility is frequently too high and expensive for needs of a producer of parts. The high financial and organizational impact of FMSs has reduced their diffusion in the past; indeed the initial outlay is so high it severely strains the financial resources of the firms.

### MODERN CONCEPTIONS IN MANUFACTURING SYSTEMS DESIGN

Nowadays, most medium and high-volume manufacturing industries currently use of portfolio of Dedicated Manufacturing Systems (DMS's) and Flexible Manufacturing Systems (FMS's) to produce their products. Generally, DMS's, or transfer lines, are based on fixed automation and produce the core products of the company at high-volume. These lines are customized hardware lines that can control cutting tools in fixed directions determined at the design stage. They are designed to produce a single product and cannot be changed. Each dedicated line typically produces a single part (e.g., a pump housing). The dedicated lines are economical when large numbers of the same part are to be produced for a period of several years or more.

się na rynku. Odpowiedzią na zaistniałe wyzwanie stała się koncepcja elastycznych systemów wytwarzania (ESP) [4].

Elastyczny system produkcyjny (ESP) jest grupą sterowanych numerycznie obrabiarek zintegrowanych poprzez centralny system sterowania. Zróżnicowane maszyny technologiczne są połączone wraz z systemami manipulacji i magazynowania poprzez zautomatyzowany system transportu (Rys. 2). Elastyczność operacyjna jest uzyskiwana poprzez możliwość realizacji operacji technologicznych na określonej grupie części produkowanych w małych partiach i przy szybkim procesie transportu [5]. System ten jest często opisywany jako zautomatyzowane gniazdo produkcyjne lub miniatura zautomatyzowana fabryka. Innymi słowy ESP jest zautomatyzowanym systemem produkcyjnym umożliwiającym produkcję jednej lub kilku rodzin wyrobów w sposób zautomatyzowany [6].

ESP są jednakże nadal zorientowane na produkcję części o dużym zróżnicowaniu w małych partiach produkcyjnych i są ukierunkowane na maksymalną możliwość reakcji na zmianę produkowanych części. Niestety koszty wdrożenia ESP są bardzo wysokie co przekłada się na koszt wytwarzania wyrobu. Jednocześnie elastyczność systemu jest często za wysoka i nie wykorzystywana przez przedsiębiorstwa. Wysoki koszt wdrożenia oraz problemy organizacyjne przy projektowaniu systemu spowodowały w przeszłości ograniczenia w jego stosowaniu.

### WSPÓŁCZESNE KONCEPCJE SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

Aktualnie większość przedsiębiorstw produkujących wyroby w średnich i dużych seriach produkcyjnych wykorzystuje w swoich zakładach zarówno dedykowane, jak i elastyczne systemy produkcyjne. Systemy dedykowane o wysokim poziomie automatyzacji wykorzystywane są do produkcji wyrobów kluczowych, produkowanych w dużych ilościach. Systemy te są projektowane pod potrzeby zakładu, a konfiguracja systemu zdefiniowana jest na etapie jego projektowania. Przeznaczone są najczęściej do produkcji jednego rodzaju wyrobu, a jego struktura jest niezmienna. Zautomatyzowane linie produkcyjne wykazują wysoką efektywność przy produkcji dużej ilości tej samej części przez wiele lat.

FMS's produce a variety of products on the same system. They typically consist of computer numerically controlled (CNC) machines, and other programmable automation. CNC machines often use large tool magazines and several axes-of-motion to provide general flexibility which has the potential to produce a variety of parts of different types. But in many cases not all these axes-of-motion are utilized in the production of each part, which means that the machine is underutilized and its initial cost is partially wasted [8]. Typically, the structure of each FMS and the structure of its CNC machines cannot be changed. The production capacity of FMS's is fixed and is usually lower than that of dedicated lines, because their initial cost is higher [9].

However, medium and high-volume manufacturers are now facing new market conditions characterized by: (1) pressure to quickly introduce new products at low costs, and (2) large fluctuations in product demand. To cope with these needs and to stay competitive, manufacturing companies must possess a new type of manufacturing system that is suitable taking into account flexibility, capacity and functionality [10].

To avoid mentioned above problems conceptions of Reconfigurable Manufacturing System (RMS) and Focused Flexibility Manufacturing System (FFMS) were invented.

### RECONFIGURABLE MANUFACTURING SYSTEM (RMS)

Idea of RMSs was invented in 1999 in the Engineering Research Center for Reconfigurable Manufacturing Systems (ERC/RMS) at the University of Michigan College of Engineering [11]. The RMS main goal is summarized by the statement – *Exactly the capacity and functionality needed, exactly when needed.*

A reconfigurable manufacturing system (RMS) having an adjustable structure is designed based upon market demand and can be readily changed from a first desired production capacity to a second desired production capacity to manufacture a desired amount of product from a family of products [12]. RMSs are marked by six core reconfigurable characteristics, as summarized in Tab. 1.

In general, reconfigurable manufacturing systems, are designed at the outset for rapid change in structure, as well as in hardware and software components, in order to quickly adjust production capacity and functionality within a part family in response to sudden changes in market or regulatory requirements [13]. Such a reconfigurable manufacturing system is generally indicated in Fig. 5. The system (10) typically includes a plurality of workstations (12) including reconfigurable milling machines (14). The system also includes a control system including an operation station (16) and reconfigurable controllers (18) for controlling the reconfigurable machines (14). The operator station (16) is in communication with the reconfigurable workstations (12) and the reconfigurable controllers (18) are in communication with each other. The system further includes a reconfigurable material handling system including a gantry robot (20), at least one wireless AGV (22), and an array of antenna receivers and transmitters

ESP umożliwiają produkcję zróżnicowanych wyrobów w tym samym systemie. Składają się one zwykle z obrabiarek sterowanych numerycznie (CNC) i innych urządzeń zautomatyzowanych. Obrabiarki CNC wyposażone są w duże magazyny narzędzi i posiadają możliwość obróbki w wielu osiach, co zapewnia dużą elastyczność przy produkcji wielu różnych części. Jednakże w wielu przypadkach wykorzystanie wszystkich osi znajduje zastosowanie jest przy produkcji pojedynczych części, co oznacza, iż maszyna nie jest należycie wykorzystana, a tym samym generuje straty [8]. W większości przypadków struktura ESP i układ maszyn CNC nie może być zmieniona - co oznacza, że poziom zdolności produkcyjnej jest stały, a jej poziom wykorzystania jest niższy niż w przypadku dedykowanych systemów produkcyjnych [9].

Jednakże, producenci wyrobów o średnich i dużych seriach produkcyjnych aktualnie muszą stawić czoła nowym wymaganiom rynku w postaci: (1) konieczności szybkiego wprowadzania nowych wyrobów przy niskich kosztach wytwarzania, (2) wysokiej zmienności popytu. Aby sprostać tym wyzwaniom i pozostać konkurencyjnymi przedsiębiorstwa muszą sięgać po nowe formy systemów produkcyjnych opartych na elastyczności, wykorzystaniu zdolności produkcyjnych i funkcjonalności [10].

Aby sprostać wymaganiom zdefiniowanym powyżej w ostatnich latach pojawiły się nowe koncepcje systemów produkcyjnych takich jak Rekonfigurowalne Systemy Produkcyjne (RSP) i Dedykowane Elastyczne Systemy Produkcyjne (DESP).

### REKONFIGUROWALNE SYSTEMY PRODUKCYJNE (RSP)

Idea RSP pojawiła się w 1999 roku w Centrum Badawczym Rekonfigurowalnych Systemów Produkcyjnych (ERC/RMS) Uniwersytetu Michichan [11]. Główne założenie systemu zawarte jest w stwierdzeniu - *Dokładnie tyle zdolności produkcyjnych i funkcjonalności ile trzeba i kiedy trzeba.*

W rekonfigurowalnych systemach produkcyjnych istnieje możliwość zmiany struktury systemu w zależności od potrzeb rynkowych dając możliwość zmiennego poziomu mocy produkcyjnych uzależnionych od ilości i rodzaju wytwarzanych produktów [12]. RSP są charakteryzowane przez pryzmat sześciu kluczowych charakterystyk przedstawionych w tabeli 1.

Zasadniczo rekonfigurowalne systemy produkcyjne są od początku projektowane z ukierunkowaniem na możliwość szybkich zmian zarówno w obszarze struktury produkcyjnej, jak też oprogramowania w taki sposób, aby możliwe było uzyskanie takiego poziomu zdolności produkcyjnych i funkcjonalności systemu jaka jest niezbędna do realizacji bieżących zleceń produkcyjnych [13]. Przykładowa struktura takiego systemu została pokazana na rys. 3. System (10) zwykle składa się z określonej liczby stacji roboczych (12) włączając w to rekonfigurowalne centra frezarskie (14). System zawiera także system sterowania stacjami roboczymi (16) oraz rekonfigurowalne sterowniki (18) mające na celu sterowanie rekonfigurowalnymi maszynami technologicznymi (14). Stanowisko operatora (16) zapewnia komunikację pomiędzy rekonfigurowalnymi stacjami roboczymi (12) i rekonfigurowalnymi kontrolerami (18), które są ze sobą zintegrowane. Ponadto system obejmuje rekonfigurowalny system manipulacji wraz z robotem bramowym (20), przynajmniej

(23) in communication with the AGV (22). The AGV is also in communication with at least one of the reconfigurable controllers (18). The RMS allows the integration of new production technology such as a laser machining system (24) which has its own reconfigurable controller (18) which is in communication with the operator station (16) and one of the other reconfigurable controllers (18) [12].

jeden bezprzewodowy wózek AGV (22) oraz obszar odbiorników i nadajników antenowych (23) komunikujących się z wózkiem AGV (22). Wózek AGV pozostaje również w komunikacji z przynajmniej z jednym z rekonfigurowalnych kontrolerów (18). RSP umożliwia integrację nowych technologii wytwarzania takich jak system wytwarzania laserowego (24), który posiada własny kontroler (18) i pozostaje w komunikacji z panelem operatorskim (16) i jednym zrekonfigurowalnych kontrolerów (18) [12].

**Table 1**

**Charakterystyki i założenia rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych [13]**

Reconfigurable characteristics / Charakterystyka rekonfigurowalności	Description / Opis
<b>Customization</b> (flexibility limited to part family) <b>Racjonalność</b> (elastyczność ograniczona do grupy części)	System or machine flexibility limited to a single product family, thereby obtaining customized flexibility. System projektowany jest ze ścisłym ukierunkowaniem na zapewnienie elastyczności RSP na poziomie ściśle dostosowanym do aktualnych potrzeb produkcyjnych.
<b>Convertibility</b> (design for functionality changes) <b>Zmienność</b> (projektowanie pod kątem zmian funkcjonalności systemu)	The ability to easily transform the functionality of existing systems and machines to suit new production requirements. Zdolność do szybkiej zmiany funkcjonalności istniejącego systemu, maszyn i sterowników w celu dostosowania się do nowych zadań produkcyjnych.
<b>Scalability</b> (design for capacity changes) <b>Skalowalność</b> (projektowanie pod kątem zmian zdolności produkcyjnych)	The ability to easily modify production capacity by adding or subtracting manufacturing resources (e.g. machines) and/or changing components of the system. Zdolność do łatwej zmiany poziomu zdolności produkcyjnych RSP poprzez zmianę struktury systemu lub zmianę zdolności produkcyjnych określonych elementów RSP.
<b>Modularity</b> (components are modular) <b>Modułowość</b> (elementy systemu mają budowę modułową)	The compartmentalization of operational functions into units that can be manipulated between alternate production schemes for optimal arrangement. Wszystkie główne składniki systemu mają budowę modułową, co umożliwia łatwą zmianę struktury systemu lub urządzenia w celu dostosowania się do potrzeb rynkowych.
<b>Integrability</b> (interfaces for rapid integration) <b>Integralność</b> (umożliwiająca szybką integrację)	The ability to integrate modules rapidly and precisely by a set of mechanical, informational, and control interfaces that facilitate integration and communication. Zdolność do szybkiej i precyzyjnej integracji modułów przez zbiór mechanicznych, informatycznych i kontrolnych połączeń umożliwiających ich integrację i komunikację.
<b>Diagnosability</b> (design for easy diagnostic) <b>Diagnozowalność</b> (projektowanie pod kątem łatwej diagnostyki)	The ability to automatically read the current state of a system to detect and diagnose the root causes of output product defects, and quickly correct operational defects. Oznacza zdolność do automatycznego odczytu aktualnego stanu systemu oraz możliwość wykrywania i diagnozowania przyczyn powstawania braków produkcyjnych.

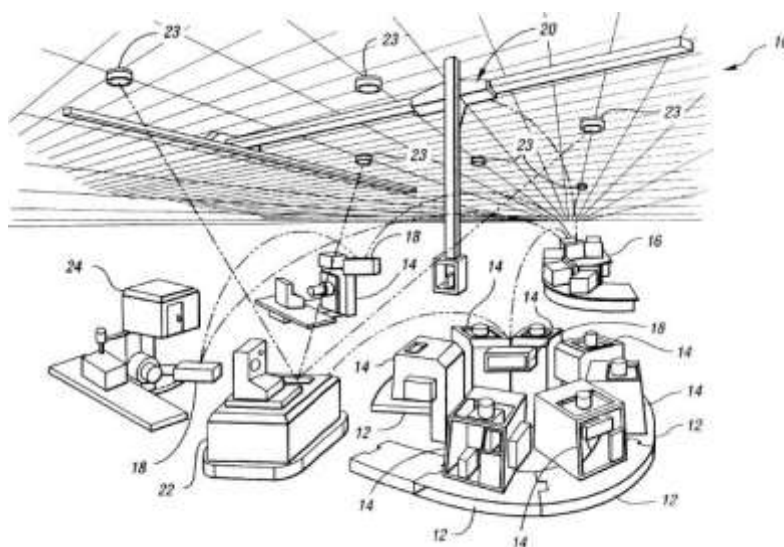


Fig. 3 - An example structure of reconfigurable manufacturing system / Przykład struktury rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego [12]

As distinguished from flexible manufacturing systems (FMSs), an RMS has the structure which allows for rapid adjustment of production capacity and functionality, in response to new market circumstances, by basic change of its hardware and software components. So, while the structure of DMLs and FMSs are static, RMSs are dynamic with level of flexibility, capacity and functionality directly fitting the needs of the system in any moment of its life.

RMSs can be noticed as an answer to the need for facing continuous changes in the production problems. In fact, reconfigurability describes the operating ability of a production system or device to switch with minimal effort and delay to a particular family of work pieces or subassemblies through the addition or removal of functional elements.

However, despite the concept of reconfigurable resources is highly innovative it is quite difficult to be pursued considering available software and hardware technologies. Unfortunately, this approach is also not always cost-effective. Firstly, the reconfigurability option should be designed in order to accomplish its implementation when changes occur. Secondly, any reconfiguration along the system life-cycle leads to face not only the installation costs but also operating costs related for instance to the ramp-up phase, typically characterized by machine malfunctioning and breakdown, lost production and learning [14].

### **FOCUSED FLEXIBILITY MANUFACTURING SYSTEMS (FFMSs)**

The second modern conception of manufacturing systems design is a conception of Focused Flexibility Manufacturing Systems (FFMSs). FFMSs represent also a competitive answer to cope with the need of customized flexibility and they guarantee the optimal trade-off between productivity and flexibility [15]. Moreover, the customization of flexibility on specific production problems leads to the minimization of the system cost during its life-cycle. Indeed, the flexibility degree in FFMSs is related to their ability to cope with volume, mix and technological changes, and it must take into account both present and future changes [16].

The required level of system flexibility impacts in the architecture of the system and the explicit design of flexibility often leads to hybrid systems, i.e. automated integrated systems in which parts can be processed by both general purpose and dedicated machines. This is a key issue of FFMSs and results from the matching of flexibility and productivity that characterize FMSs and DMSs, respectively.

FFMSs are hybrid systems, in the sense that they can be composed both of general purpose and dedicated resources. This innovative architecture derives from the consideration that system flexibility is related both to the flexibility of each single selected resource and to the interaction among the resources which compose the system. For instance, a flexible system can be composed of dedicated machines and highly flexible carries. The whole FFMS design approach is presented in Fig. 4

W odróżnieniu od elastycznych systemów produkcyjnych RSP posiada strukturę umożliwiającą, poprzez prostą wymianę elementów technicznych i oprogramowania, szybkie dostosowanie poziomu zdolności produkcyjnych i funkcjonalności w zależności od potrzeb rynku. Podczas, gdy struktury dedykowanych systemów produkcyjnych i ESP pozostają stałe, struktura RSP ma charakter dynamiczny w obszarze elastyczności, zdolności produkcyjnych i funkcjonalności w każdym momencie istnienia.

RSP mogą być odpowiedzią na potrzebę nieustannych zmian w obszarze produkcji. W rzeczywistości rekonfigurowalność oznacza zdolność operacyjną systemu produkcyjnego lub urządzenia do prostego dodania lub usunięcia elementu systemu w celu produkcji konkretnej grupy wyrobów.

Chociaż koncepcja rekonfigurowalnych zasobów jest wysoce innowacyjna to bardzo trudno dostosować do niej aktualnie dostępne rozwiązania techniczne i programistyczne. Niestety podejście to nie jest też zawsze efektywne ekonomicznie. Po pierwsze, opcja rekonfigurowalności powinna być stosowana w momencie, gdy mogą się pojawić zmiany zapotrzebowania. Po drugie, każda rekonfiguracja w okresie życia systemu pociąga za sobą nie tylko koszty instalacji ale również koszty eksploatacyjne związane m.in. z czasem przezbrojenia, zwykle określanym jako przestój maszyny, jej awarię oraz straty produkcji i wiedzy [14].

### **DEDYKOWANE ELASTYCZNE SYSTEMY PRODUKCYJNE (DESP)**

Drugą z współczesnych koncepcji projektowania systemów produkcyjnych jest koncepcją Dedykowanych Elastycznych Systemów Produkcyjnych (DESP). DESP prezentują również konkurencyjną odpowiedź na potrzebę racjonalnej elastyczności i gwarantują optymalny kompromis pomiędzy produktywnością i elastycznością [15]. Ponadto racjonalne podejście do elastyczności połączone z określonymi problemami produkcyjnymi prowadzi do minimalizacji kosztów implementacji i eksploatacji w całym cyklu życia systemu. W rzeczy samej w przypadku DESP poziom elastyczności systemu jest uwarunkowany możliwością produkcji określonej ilości i zróżnicowania asortymentowego wytwarzanych części [16].

Wymagany poziom elastyczności systemu warunkuje architekturę systemu, a jasno sprecyzowany poziom elastyczności często uzasadnia konieczność budowy systemów hybrydowych, tj. zautomatyzowanych, zintegrowanych systemów, w których części mogą być wytwarzane zarówno przez maszyny uniwersalne, jak też specjalistyczne.

DESP są systemami hybrydowymi, co oznacza, że mogą być oparte zarówno na zasobach o charakterze uniwersalnym, jak też specjalistycznym. Ta innowacyjna architektura wywodzi się z istoty połączenia elastyczności każdego z elementów systemu i powiązań pomiędzy elementami - co decyduje o strukturze systemu. Dla przykładu, system może składać się zarówno z maszyn dedykowanych oraz wysoce elastycznych przenośników. Ogólny diagram procesu projektowania DESP został zaprezentowany na rys. 4.

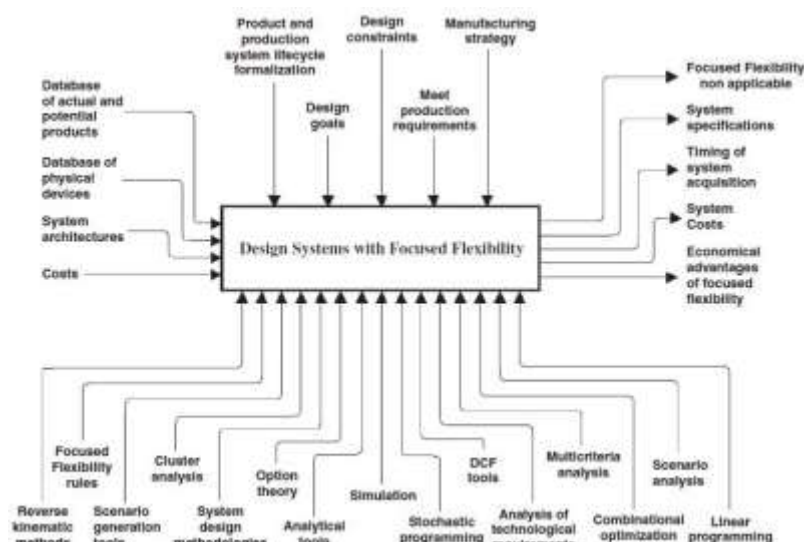


Fig. 3 - Focused Flexibility Manufacturing System's design diagram / Diagram procesu projektowania Dedykowanych Elastycznych Systemów Produkcyjnych [15]

At first sight FFMSs could appear to be similar to Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs) - the difference between these two classes of systems is in the timing of flexibility acquisition. Deciding about flexibility and reconfigurability means to consider two options. The first option deals with designing a dedicated system in which the reconfiguration option can be implemented in the future when production changes occur. This leads to design a system with the minimum level of flexibility required to cope with the present production problem. In this case FFMSs and RMSs have similar performance. The alternative option is to purchase more flexibility than the amount strictly required by the present production problem in order to avoid future system reconfigurations and ramp-ups. In this case, FFMSs have some "extra" flexibility designed to cope with future production changes, i.e. degree of flexibility designed to cope with future production changes, i.e. a degree of flexibility tuned both on present and future production problems.

## CONCLUSIONS

Manufacturing companies in the 20<sup>th</sup> and the 21<sup>st</sup> century face increasingly frequent and unpredictable market changes driven by global competition, violent technical and technological development and constantly varying product demand. Consequently, both manufacturing methods and organization of manufacturing systems have changed during this time. The 20<sup>th</sup> century begins with craft manufacturing as only way of production.

Since the 1920s has begun fast development of different forms of organization of production and manufacturing systems design. When analyze used forms of production systems during the last century it can be noticed that flexibility has very different importance. Traditionally, dedicated manufacturing systems (DMS) have been adopted for the production of a small family of part types required by the market in high volumes. DMSs are characterized by low scalability and therefore they are typically dimensioned on the maximum market demand that the company forecasts to satisfy in the

Na pierwszy rzut oka DESP wydają się być podobne do rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych (RSP) - różnica pomiędzy tymi dwoma klasami systemów polega jednak na różnym podejściu do projektowania elastyczności systemu. Mówiąc o elastyczności i rekonfigurowalności należy rozważyć dwie opcje. Pierwsza z opcji zakłada, że opcja rekonfigurowalności może zostać zastosowana w przyszłości kiedy pojawią się takie potrzeby produkcyjne. Prowadzi to do projektowania systemu o minimalnym poziomie elastyczności odpowiednim dla aktualnego zadania produkcyjnego. W tym przypadku DESP i RSP są do siebie bardzo zbliżone. Alternatywna opcja zakłada, iż system należy projektować z większym od oczekiwanego w danym momencie poziomie elastyczności po to aby w przyszłości uniknąć konieczności rekonfiguracji, a tym samym czasów przebrojenia. W tym przypadku DESP posiada pewien poziom "ekstra" elastyczności przewidzianych do zadań produkcyjnych, które mogą pojawić się w przyszłości, a tym samym posiada poziom elastyczności umożliwiający realizację bieżących i przyszłych zadań produkcyjnych.

## WNIOSKI

W XX i XXI wieku przedsiębiorstwa produkcyjne musiały stawić czoła częstym i nieprzewidywalnym zmianom rynkowym będących rezultatem konkurencji o charakterze globalnym, gwałtownemu rozwojowi technicznemu i technologicznemu oraz zmieniającym się potrzebom rynku. W konsekwencji zarówno metody wytwarzania, jak też sposoby organizacji systemów produkcyjnych ulegały zmianie w tym czasie. Wiek XX zapoczątkowała praca rzemieślnicza, która była jedynym sposobem produkcji.

Od lat 20. XX wieku rozpoczął się gwałtowny rozwój różnych form organizacji produkcji i projektowania systemów produkcyjnych. Analizując wykorzystywane w ostatnim stuleciu formy systemów produkcyjnych należy zwrócić uwagę, iż pojęcie elastyczności było traktowane w sposób bardzo zróżnicowany. Dedykowane systemy produkcyjne zostały dostosowane do produkcji małych grup wyrobów wymaganych przez rynek w dużych ilościach. Charakteryzuje je też niska skalowalność, dlatego też są projektowane w sposób



future (volume flexibility). As a consequence, in many situations DMSs do not operate at full capacity. On the other hand, flexible manufacturing systems have been adopted to produce a large variety of parts in small quantities and they are conceived to react to most of the possible changes. The investment to acquire an FMS is very high and it considerably affects the cost to produce a part; indeed its flexibility may be too high and expensive for the needs of a producer.

Nowadays manufacturing flexibility has a strategic role for firms that want to compete in a reactive or proactive way [12]. In fact, the ability of designing production systems whose flexibility degree is customized on the present production problem and at the same time, it takes into account future product evolutions, can lead to competitive advantage.

From the scientific perspective, focusing the flexibility of a production system on the specific needs represents a challenging problem. Indeed, the customization of system flexibility provides economic advantages in terms of system investment costs, but on the other hand, tuning on the production problems reduces some of the safety margins which allow decoupling the various phases of manufacturing system design. Therefore, manufacturing system flexibility must be rationalized and it is necessary to find out the best trade-off between productivity and flexibility by designing manufacturing systems endowed with the right level of flexibility required by the production problem. In consequence, from the designer of modern manufacturing systems point of view it is very important to answer following questions:

- ✓ Are the conceptions of FFMS and RMS proper for modern companies?
- ✓ Which of conception – FFMS or RMS is much suitable for defined company?
- ✓ How to define the desired level of system's flexibility?
- ✓ How to forecast the way of development of manufactured parts?
- ✓ How to plan and optimize the cost of manufacturing system in its life-cycle?

## REFERENCES

- [1]. Koren Y. (2010) - The Global Manufacturing Revolution. Product-Process-Business Integration & Reconfigurable Manufacturing, Wiley, New Jersey, 2010.
- [2]. Gola A. (2014) - *Economic Aspects of Manufacturing Systems Design*, Actual Problems of Economics, No. 6 (156), pp. 205-212.
- [3]. Womack J.P., Jones D.T., Roos D. (1990) - The Machine that Changed the World. The Story of Lean Production, Rawson Associates, New York, pp. 28-54.
- [4]. Fulkerson B. (1997) - A Response to Dynamic Change in the Market Place, Journal of Decision Support Systems, Vol. 21, Issue 3, pp. 199-214.
- [5]. Warnecke H.J., Steinhilper R. (1985) - Flexible Manufacturing Systems, IFS Publications Ltd & Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, pp. 8-23.
- [6]. Świć A., Gola A. (2013) - Economic Analysis of Casing Parts Production in a Flexible Manufacturing System, Actual Problems of Economics, No. 3 (141), pp. 526-533.
- [7]. <http://www.pietrocarnaghi.com>

umożliwiający realizację produkcji w ilości zgodnej z przewidywaniami na wzrost w przyszłości (tzw. elastyczność wolumenowa). W konsekwencji, w wielu sytuacjach systemy dedynowane nie pracują z pełnym wykorzystaniem mocy produkcyjnej. Z drugiej zaś strony elastyczne systemy produkcyjne zostały dostosowane do produkcji zróżnicowanych wyrobów w małych seriach produkcyjnych, co umożliwia reakcję na zmiany rynkowe. Niestety koszty implementacji ESP są bardzo wysokie, co przekłada się na koszty produkcji.

Obecnie elastyczność produkcji stanowi strategiczną rolę w przypadku firm, które chcą konkurować w reaktywny lub proaktywny sposób. W rzeczywistości, zdolność projektowania systemów produkcyjnych, których poziom elastyczności odpowiada aktualnym i prognozowanym wymaganiom produkcyjnym staje się wyzwaniem i może stanowić czynnik przewagi konkurencyjnej.

Od strony naukowej, prognozowanie niezbędnego poziomu elastyczności systemów produkcyjnych stanowi wyzwanie. Racjonalność w zakresie poziomu elastyczności daje możliwość ekonomicznych korzyści w zakresie kosztów inwestycyjnych, jednakże z drugiej strony nakłada na system ograniczenia mogące okazać się krytycznymi w przyszłości. Dlatego też elastyczność systemu musi być racjonalizowana i niezbędne jest znalezienie kompromisu pomiędzy produktywnością i elastycznością, biorąc pod uwagę zarówno obecne, jak też przyszłe zapotrzebowanie rynkowe. W konsekwencji, z punktu widzenia projektanta systemu, bardzo istotne pozostaje znalezienie odpowiedzi na następujące pytania:

- ✓ Czy koncepcje DESP i RSP są odpowiednie dla współczesnych przedsiębiorstw?
- ✓ Która z koncepcji - DESP i RSP jest bardziej odpowiednia dla danego przedsiębiorstwa?
- ✓ Jak zdefiniować właściwy poziom elastyczności systemu produkcyjnego?
- ✓ W jaki sposób przewidzieć kierunki rozwoju produkowanych wyrobów?
- ✓ Jak zaplanować i zoptymalizować koszty systemu produkcyjnego w jego całym cyklu życia?

## BIBLIOGRAFIA

- [1]. Koren Y. (2010) - The Global Manufacturing Revolution. Product-Process-Business Integration & Reconfigurable Manufacturing, Wiley, New Jersey, 2010.
- [2]. Gola A. (2014) - *Economic Aspects of Manufacturing Systems Design*, Actual Problems of Economics, No. 6 (156), pp. 205-212.
- [3]. Womack J.P., Jones D.T., Roos D. (1990) - The Machine that Changed the World. The Story of Lean Production, Rawson Associates, New York, pp. 28-54.
- [4]. Fulkerson B. (1997) - A Response to Dynamic Change in the Market Place, Journal of Decision Support Systems, Vol. 21, Issue 3, pp. 199-214.
- [5]. Warnecke H.J., Steinhilper R. (1985) - Flexible Manufacturing Systems, IFS Publications Ltd & Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, pp. 8-23.
- [6]. Świć A., Gola A. (2013) - Economic Analysis of Casing Parts Production in a Flexible Manufacturing System, Actual Problems of Economics, No. 3 (141), pp. 526-533.
- [7]. <http://www.pietrocarnaghi.com>

- [8]. Gola A., Świć A (2007).- Intelligent decision support system for FMS machine tool subsystem design, Applied Computer Science, Vol. 3, No 1, pp. 109-124.
- [9]. Gola A., Relich M., Kłosowski G., Świć A. (2015) - Mathematical models for manufacturing systems capacity planning and expansion - an overview, Applied Mechanics and Materials, Vol. 791, pp. 125-131.
- [10]. Gola A., Świć A. (2012) - Directions of Manufacturing Systems' Evolution from the Flexibility Level Point of View, [w:] R.Knosala (ed.) Innovations in Management and Production Engineering, Oficyna Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, s. 226-238.
- [11]. Koren Y., Heisel U., Jovane F., Moriwaki T., Pritschow G., Ulsoy G., Van Brussel H. (1999): Reconfigurable Manufacturing Systems, Annals of the CIRP, Vol. 48, No. 2, pp. 527-540.
- [12]. United States Patent: Reconfigurable Manufacturing System Having a Production Capacity Method for Designing Same And Method for Changing its Production Capacity, Patent No.: US 6 349 237 B1, Date of Patent: 19<sup>th</sup> of February 2002.
- [13]. Koren Y., Shpitalni M. (2011) - Design of reconfigurable manufacturing systems, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 29, Issue 4, pp. 130-141.
- [14]. Matta A., Tomasella M., Valente A. (2008) - Impact of ramp-up on the optimal capacity-related reconfiguration policy, International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 19, No. 3, pp. 173-194.
- [15]. Tolio T. (2009) - Design of Flexible Manufacturing Systems. Methodologies and Tools, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 3-18.
- [16] Terkaj W., Tolio T. (2007) - An Approach to Production System Design Considering the Utility of the Machine Tool Builder, 40<sup>th</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Liverpool, UK, 30 May-1 June 2007.

- [8]. Gola A., Świć A (2007).- Intelligent decision support system for FMS machine tool subsystem design, Applied Computer Science, Vol. 3, No 1, pp. 109-124.
- [9]. Gola A., Relich M., Kłosowski G., Świć A. (2015) - Mathematical models for manufacturing systems capacity planning and expansion - an overview, Applied Mechanics and Materials, Vol. 791, pp. 125-131.
- [10]. Gola A., Świć A. (2012) - Directions of Manufacturing Systems' Evolution from the Flexibility Level Point of View, [w:] R.Knosala (ed.) Innovations in Management and Production Engineering, Oficyna Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, s. 226-238.
- [11]. Koren Y., Heisel U., Jovane F., Moriwaki T., Pritschow G., Ulsoy G., Van Brussel H. (1999): Reconfigurable Manufacturing Systems, Annals of the CIRP, Vol. 48, No. 2, pp. 527-540.
- [12]. United States Patent: Reconfigurable Manufacturing System Having a Production Capacity Method for Designing Same And Method for Changing its Production Capacity, Patent No.: US 6 349 237 B1, Date of Patent: 19<sup>th</sup> of February 2002.
- [13]. Koren Y., Shpitalni M. (2011) - Design of reconfigurable manufacturing systems, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 29, Issue 4, pp. 130-141.
- [14]. Matta A., Tomasella M., Valente A. (2008) - Impact of ramp-up on the optimal capacity-related reconfiguration policy, International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 19, No. 3, pp. 173-194.
- [15]. Tolio T. (2009) - Design of Flexible Manufacturing Systems. Methodologies and Tools, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 3-18.
- [16] Terkaj W., Tolio T. (2007) - An Approach to Production System Design Considering the Utility of the Machine Tool Builder, 40<sup>th</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Liverpool, UK, 30 May-1 June 2007.