

ELASTYCZNE SYSTEMY WYTWÓRCZE – ROZWÓJ W KIERUNKU CYFROWEJ PRODUKCJI

Iwona ŁAPUŃKA, Katarzyna MAREK-KOŁODZIEJ, Piotr WITTBRODT

Streszczenie: Celem artykułu jest analiza współczesnych problemów i kierunków rozwoju elastycznych systemów wytwórczych ze szczególnym uwzględnieniem idei cyfrowej produkcji, postulowanej w ramach czwartej rewolucji przemysłowej. W dekompozycji systemu gospodarczo-produkcyjnego szczególną rolę przypisuje się procesom informacyjno-sterującym związanym z maszynowym przetwarzaniem danych przy wykorzystaniu informatycznych technologii sztucznej inteligencji i przyszłościowych trendów związanych z digitalizacją materii. Badanie przesłanek rozwoju i podstawowych cech elastycznych systemów wytwórczych we wskazanym zakresie pozwoli w przyszłości na kontekstową prezentację oraz weryfikację założeń funkcjonalnych i systemowych wielowymiarowej koncepcji niezawodności dla dynamicznej struktury sterowania realizacją projektów produkcyjnych.

Słowa kluczowe: elastyczne systemy wytwórcze, FMS, cyfrowa produkcja, Przemysł 4.0.

1. Wprowadzenie

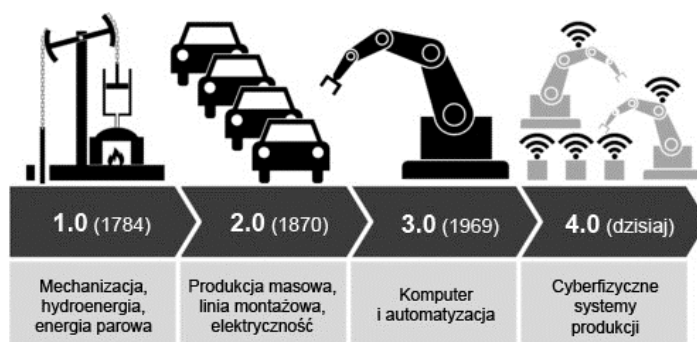
Z punktu widzenia producenta współczesny rynek to dynamiczna struktura, podlegająca nieustannym prawom popytu i podaży. Na przestrzeni ostatnich lat warunki prowadzenia działalności gospodarczej ulegały istotnym zmianom, szczególnie tam, gdzie rosło znaczenie technologii informacyjnych, szybkiego obiegu informacji czy nowych form interakcji z klientami. Znacznemu skróceniu uległa długość produkowanych serii oraz czas życia wyrobów, przy jednoczesnym zwiększaniu się różnorodności i stopnia złożoności produktów. Klient stał się coraz bardziej wymagający, w wielu obszarach działalności przekształcił się w prosumenta, a producenci zostali zmuszeni do przyjęcia nowych reguł gry, w której to masowa kastomizacja wyrobów i usług stała się bardziej korzystna niż masowa produkcja.

Jednym z najbardziej znaczących obszarów działalności przedsiębiorstw w polskiej gospodarce są procesy produkcyjne. Z analiz wynika, że większą konkurencyjność zyskują te przedsiębiorstwa, które potrafią implementować innowacyjne techniki wytwarzania wykorzystując istniejącą infrastrukturę i tradycyjne rozbudowane rynki. Takie podejście jest cechą intensywnej fazy globalizacji gospodarczej, która zdominuje obecną (ekstensywną) w ciągu najbliższej dekady [1]. W związku z tym podejmowane są próby tworzenia nowych form organizacji produkcji zgodnie z ewolucyjnym postępowaniem w zakresie zautomatyzowanych systemów wytwarzania – aż do samoregulujących się automatycznych gniazd wytwórczych (SAGW) i samoprzekształcających się automatycznych systemów wytwórczych (SASW), co przedstawiono w pracach [2, 3].

Z uwagi na dynamicznie rosnącą złożoność systemów produkcyjnych już klasyczne formy elastycznych systemów wytwórczych FMS (ang. *Flexible Manufacturing System*) nie mogą sprostać wymogom współczesnej cywilizacji. Prowadzi to do malejącej kontroli człowieka nad tworzonymi systemami, co w przedmiotowym obszarze objawia się niską

tolerancją tych systemów na zakłócenia. Jej podniesienie, bez konieczności angażowania się w każdym przypadku człowieka, a także wzrost kontroli złożoności systemu, bez straty jego funkcjonalności, prowadzi do rozwiązań proponowanych w ramach inteligentnych systemów produkcyjnych IPS (ang. *Intelligent Production System*) oraz cyfrowej produkcji (ang. *digital manufacturing*) [1].

Kolejna rewolucja przemysłowa, określana mianem Przemysłu 4.0 (ang. *Industry 4.0*), już się rozpoczęła (por. rys. 1). Jej głównym celem jest zwiększenie globalnej konkurencyjności poprzez wzrost jakości produktów oraz obniżenie kosztów produkcji. Rozwiązania w zakresie „inteligentnych fabryk” (ang. *smart factory*) i „inteligentnych usług” (ang. *smart services*) będą oferować większą elastyczność w działaniach i bardziej efektywną alokację zasobów, torując drogę dla zwinnego wytwarzania i skalowalnych rozwiązań logistycznych. Sieci komputerowe będą zintegrowane ze zunifikowanymi umiejętnościami i wymianą informacji w czasie rzeczywistym. Sterowanie procesami w trybie on-line stwarza konieczność budowy właściwego interfejsu pomiędzy człowiekiem, a maszynami i urządzeniami technologicznymi, zdefiniowanego ich wzajemną współzależnością. Złożoność systemów w XXI wieku staje się coraz bardziej istotna i wymaga bardziej wyszukanych rozwiązań. Z analiz wynika, że w ciągu ostatniej dekady została podwojona w Europie liczba robotów, coraz bardziej inteligentnych i elastycznych. Według Gartner Inc., światowego lidera w branży badawczo-doradczej IT, do 2020 roku ponad 20 miliardów urządzeń będzie w stanie się ze sobą komunikować, co stanowić może odzwierciedlenie w globalnej ekonomicznej wartości dodanej na poziomie 1,9 biliona dolarów [4].



Rys. 1. Etapy rozwoju przemysłu

Przemysł 4.0 może być zarówno szansą, jak i zagrożeniem dla przemysłu. W rzeczywistości, tradycyjne przedsiębiorstwa mają do czynienia z nowymi wyzwaniami, które zmieniają dotychczasowe zasady dotyczące produktywności i konkurencji. Przedsiębiorstwa muszą działać poprzez usunięcie barier między informacją a strukturami fizycznymi. Niezbędne jest interdyscyplinarne myślenie, zarówno w dziedzinach technicznych, jak i społecznych, w ciągłym procesie uczenia się i współpracy oraz ze znaczącym wpływem na poszczególne role zawodowe.

2. Podstawowe cechy elastycznych systemów wytwórczych

Elastyczność systemów wytwórczych umożliwia producentom łatwe dostosowywanie się do trudnych warunków współczesnego otoczenia, wynikających z konieczności zmian parametrów wyrobów produkowanych w krótkich lub średnich seriach, czy też zmian cech

materiałów produkcyjnych, etc. Można zmieniać asortyment i regulować wielkość serii produkowanych wyrobów, często bez przebrojenia maszyn, adekwatnie do zmieniających się wymagań. Zagadnienia te są szczególnie istotne w warunkach gospodarki urynkowanej, wymuszającej na producentach zdolność do szybkiego reagowania na potrzeby odbiorców.

Elastyczność uzyskuje się dzięki zaawansowanej automatyzacji procesów produkcyjnych oraz systemów przezbrajania połączonej z komputeryzacją planowania i sterowania produkcją. Poziom elastyczności danego systemu produkcyjnego jest determinowany zakresem zadań realizowanych w tym systemie. Elastyczny system sterowania produkcją powinien zapewnić uzyskanie następujących efektów [1]:

- urozmaicenie asortymentu produkowanych wyrobów,
- skrócenie czasów przebrojeń i czasu uruchomienia nowych wyrobów,
- skrócenia cyklu produkcyjnego i zmniejszenie zapasów produkcji w toku,
- możliwość lepszego przystosowywania się do wymogów odbiorców (np. krótsze terminy dostaw, krótsze serie, częstsze zmiany asortymentów).

Elastyczne systemy wytwórcze w szczególności dedykowane są pełnej automatyzacji produkcji mało i średnioseryjnej w zakresie przedmiotów technologicznie podobnych. Elastyczność wynika z luźnego powiązania obrabiarek, przy czym czasy przebrojenia ograniczone są do minimum, a praca odbywa się według dziennych programów produkcyjnych. Podstawowymi walorami technicznymi FMS oraz źródłem efektów przy ich stosowaniu są [1]:

- kompleksowa automatyzacja obróbki części technologicznie podobnych wytwarzanych w niewielkich seriach,
- duża elastyczność w asortymencie obrabianych przedmiotów i w liczbie operacji technologicznych,
- skrócenie cyklu produkcyjnego,
- skrócenie czasu wykonania nowo uruchomionych wyrobów mieszczących się w asortymencie przedmiotów przewidzianych do obróbki w danym systemie,
- zmniejszenie zapasów surowców, robót w toku i wyrobów gotowych oraz kosztów ich magazynowania,
- zmniejszenie liczby braków,
- podwyższenie stopnia wykorzystania obrabiarek, narzędzi i powierzchni produkcyjnej,
- łatwa kontrola przebiegu produkcji,
- uporządkowanie dróg transportu międzyoperacyjnego oraz wyeliminowanie ciężkiej pracy fizycznej związanej z przemieszczeniem obrabianych przedmiotów,
- podniesienie kultury technicznej zakładu oraz dalsza humanizacja pracy.

Wdrażanie FMS wymaga stosowania nowoczesnych urządzeń produkcyjnych, takich jak: centra obróbkowe, roboty manipulacyjne, technologiczne i montażowe, zautomatyzowane wózki transportowe, modułarne systemy narzędzi, uchwytów, chwytaków, palet, magazynów, czy też pól odkładczych. Ponadto muszą być implementowane odpowiednie systemy informatyczne nadzorujące pracę urządzeń, zapewniające szybki i niezawodny przepływ informacji oraz rozdział operacji produkcyjnych gwarantujący możliwie wysokie wykorzystanie zdolności produkcyjnych. W praktyce przemysłowej obserwuje się coraz większy wzrost znaczenia zagadnień prawidłowego projektowania systemów produkcyjnych zapewniających właściwą oraz możliwie efektywną realizację różnorodnych zleceń produkcyjnych, co jest bardzo istotne z punktu widzenia konkurencyjnej i innowacyjnej gospodarki.

2.1. Elastyczna automatyzacja wytwarzania

Jednym z kluczowych rozwiązań proponowanych w przemyśle, które pozwalało na wprowadzanie szybkich zmian w produkcji oraz reagowanie na zmieniające się potrzeby klientów, przy jednoczesnym umożliwieniu koordynacji obciążenia urządzeń wytwórczych i środków transportowych, stało się nadrzędne sterowanie w ramach elastycznej automatyzacji wytwarzania. Jej istotą jest wprowadzenie do systemu wytwórczego składnika niematerialnego, jakim jest oprogramowanie. Umożliwia ono przetworzenie dostępnych danych w polecenia dla układu sterowania. Dzięki temu możliwa jest optymalizacja przepływów materiałowych oraz wykorzystanie środków wytwórczych w systemie. Konieczna jest integracja wielu różnych maszyn i urządzeń, dzięki czemu system z nich złożony może funkcjonować jako jedno wielomaszynowe urządzenie wytwórcze. Zgodnie z definicją zaproponowaną przez J. Krzyżanowskiego elastyczna automatyzacja to pewna liczba zautomatyzowanych obrabiarek i/lub innych urządzeń wytwórczych połączonych ze sobą systemem transportowym, sterowana bezpośrednio hierarchicznym systemem komputerowym i przewidziana do wytwarzania w dowolnej kolejności elementów lub zespołów należących do z góry określonej rodziny [5].

Elastyczna automatyzacja wytwarzania doskonale nadaje się do produkcji różnorodnych wyrobów w niewielkich i średnich seriach. Ze względu na tendencje rynkowe ma wiele przewag nad wytwarzaniem opartym na niezależnej pracy pojedynczych obrabiarek (i innych urządzeń wytwórczych), jak również wysoko wydajną produkcją z wykorzystaniem obrabiarek specjalnych (zadaniowych) i linii produkcyjnych [5, 6].

Budowa FMS o wyższym stopniu automatyzacji nie jest możliwa bez stosowania nowoczesnych metod modelowania i komputerowego wspomaganie prac projektowych. Dla celów projektowania FMS, a w szczególności w zagadnieniach planowania, harmonogramowania i sterowania procesami dyskretnymi, sięga się do metod stosowanych w modelowaniu komputerowych systemów operacyjnych i do modeli badań operacyjnych. W elastycznych systemach wytwórczych celowy jest wybór modeli, które uwzględniają postulat szybkiego czasu reakcji. Prostota, jasność i efektywność algorytmów projektowania, elastyczność planowania, szybkość i trafność decyzji, alternatywność rozwiązań powinny decydować o wyborze metody budowy systemu. Z uwagi na dużą dynamikę nieprzewidzianych zmian i zakłóceń w procesie produkcyjnym sterowanie przebiegiem produkcji powinno odbywać się przy zastosowaniu metod algorytmicznych prostych i przybliżonych typu heurystycznego [1].

Duża ilość przetwarzanej informacji i postulat elastyczności wymagają zastosowania systemu informatycznego o konfiguracji zapewniającej szybką, ciągłą i dwustronną komunikację między stanowiskiem pracy a komputerem. Niezbędna jest instalacja terminali w pobliżu stanowisk pracy, umożliwiających bezpośrednie przesyłanie do komputera informacji o zmianach stanu zasobów produkcyjnych, jak również o stanie realizacji zadań oraz otrzymywanie z komputera informacji sterujących. Najbardziej efektywne rozwiązanie można uzyskać przy zastosowaniu komputerowych układów automatyki oraz lokalnych sieci informatycznych.

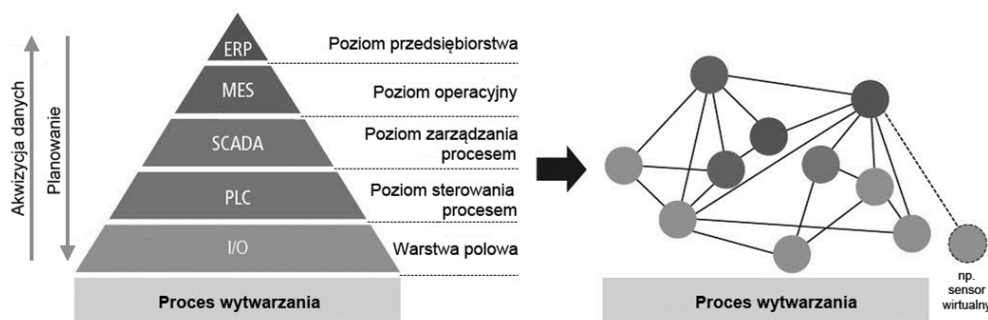
2.2. Integracja informacyjna FMS

Idea integracji stanowi podstawowy punkt wyjścia dla dochodzenia do wysokiego poziomu organizacji systemu produkcyjnego, jakim jest elastyczny system wytwórczy zintegrowany komputerowo FSM/CIM. Przyjmuje się, że jego wymiar informacyjny i jego

pochodne informatyczne muszą być uwzględniane już podczas specyfikowania funkcji dla poszczególnych podsystemów: wytwarzania, transportu, manipulacji oraz magazynowania. Podsystem informacyjno-sterujący należy określić w połączeniu z całością FMS, co jest warunkiem uzyskania odpowiedniego poziomu elastyczności informacyjnej.

Integracja systemu produkcyjnego może odbywać się w różnych aspektach, niemniej jednak obecnie podstawowe znaczenie przypisuje się integracji informacyjnej, tzn. takiej, dla której czynnikiem integrującym jest informacja (komputerowe wspomaganie). Scalanie współdziałających ze sobą elementów systemu produkcyjnego może odbywać się poprzez ich łączenie na drodze zastępowania mniejszą liczbą modułów, co redukuje liczbę elementów systemu lub ściślejsze powiązania na drodze zwiększenia liczby relacji zachodzących między nimi. Oba procesy mogą zachodzić równoległe z różnym nasileniem, przy czym zawsze dąży się do zachowania lub polepszenia funkcjonalności systemu. Dla integracji informacyjnej FMS kluczową rolę odgrywa drugi z wymienionych mechanizmów, a jego implementacja wynika ze specyfiki konfiguracji hardware'owo-software'owej [1].

Specyfikacja ISA-SP95 wyróżnia cztery poziomy przetwarzania danych o stanie produkcji i określa przyporządkowanie działań do poszczególnych poziomów. Poziom 1 i 2 obejmują ciągłą, dyskretną i wsadową kontrolę. Poziom 3 (warstwa MES) obejmuje produkcję, zarządzanie operacjami, wysyłkę produkcji, szczegółowe harmonogramowanie produkcji, zapewnienie niezawodności, etc. Poziom 4 (warstwa ERP) definiuje planowanie i logistykę, harmonogramowanie produkcji zakładu, zarządzanie operacyjne, etc. Dzisiaj wyróżnia się już pięciowarstwową architekturę w systemach sterowania (por. rys. 2). Istotną kwestią jest integracja poszczególnych warstw i sposobu wymiany danych pomiędzy nimi. Pod koniec lat 90. XX wieku proponowano różne rozwiązania tego problemu (DCOM, CORBA, etc.), ostatecznie najpowszechniejsze stało się rozwiązanie wykorzystujące komunikację według standardu OPC Unified Architecture (OPC UA) [7] na poziomach niższych i XML [8] na poziomach wyższych. Model ISA-95 specyfikuje także warstwę połączeń pomiędzy systemami MES (ang. *Manufacturing Execution Systems*) i ERP (DIS – *Data Integration Service*, wykorzystujący standard XML w formie standardu B2MML – *Buisness to Manufacturing Markup Language*) oraz wskazuje standard interfejsu OPC, jako zalecaną metodę połączenia między warstwą ISA-95 MES i SCADA (ang. *Supervisory Control And Data Acquisition*) [9].



Rys. 2. Integracja pozioma i pionowa w pięciowarstwowej architekturze systemów sterowania oraz cyberfizyczne systemy produkcji CPS

Źródło: opracowanie na podst. [10]

Nowoczesne, kompleksowe systemy sterowania i zarządzania przedsiębiorstwami produkcyjnymi mają strukturę wielopoziomową i wielowarstwową, co ma na celu podniesienie sprawności procesów decyzyjnych. Struktura fizyczna organizacji zbudowana z coraz mniejszych jednostek kolejno zagnieżdżających się w jednostkach wyższego poziomu, ma odbicie w hierarchicznej strukturze poziomów decyzyjnych. Każdy element decyzyjny danego poziomu dostrzega tylko wybrane elementy poziomu bezpośrednio niższego i do tych elementów kierowane są od niego decyzje sterujące. Na każdym poziomie pojawia się więc problem sprawnego zarządzania tylko przynależnymi elementami poziomu niższego, zgodnie z opracowaną wcześniej strategią. Decyzje sterujące przekazywane do poziomu niższego będą zależeć od założonego horyzontu planowania na poziomie decyzyjnym, zapotrzebowania na produkcję w tym horyzoncie, zdolności przerobowych elementów poziomu niższego, możliwości pozyskania energii użytkowej, surowców, wiedzy i obsady inżynierskiej. Dla wszystkich poziomów zasadniczo przyjmuje się podobny wskaźnik oceny jakości funkcjonowania danego poziomu. Powinna nim być maksymalizacja zysku z realizacji zlecenia produkcyjnego uzyskiwana na danym poziomie i w ramach rozważanego horyzontu czasowego, z uwzględnieniem określonych dla danego poziomu odniesień (np. zasoby, normy, technologie). Kolejne niższe poziomy charakteryzują się coraz bardziej skracającym się horyzontem planowania (sterowania), dokładniejszymi modelami (na których opiera się wybór strategii) oraz zwiększoną częstotliwością zakłóceń, a stąd zwiększoną częstotliwością interwencji (sterowania) [9].

Im niższy poziom, tym łatwiej poddaje się automatyzacji, a więc procesowi eliminowania człowieka (operatora) na rzecz inteligentnych urządzeń komputerowych i sterowników logicznych. Na poziomach wyższych narzędzia komputerowe są zaangażowane głównie do wspomagania podejmowanych decyzji. W takiej strukturze utrzymany jest ograniczony do jednego poziomu przepływ decyzji w kierunku góra-dół (ang. *top-down*) i jednopozomowy kierunek przekazywania informacji zwrotnej o realizacji zadań z dołu do góry (ang. *bottom-up*) (por. rys. 2). Ta zwrotna informacja powinna mieć postać najpierw sygnałów pomiarowych, na wyższym poziomie raportów okresowych, a potem sprawozdań podsumowujących.

3. Systemy wytwórcze nowej generacji – idea cyfrowej produkcji

Kompleksowe podejście w zakresie projektowania procesu produkcyjnego, a nie jak dotąd ukierunkowanie na fragmentaryczny proces wytwarzania, wymusiło opracowanie nowoczesnych systemów wytwarzania o różnym stopniu zintegrowania. Systemy te uwzględniają również przepływ materiałów i informacji, a więc zajmują się logistyką procesu produkcyjnego z uwzględnieniem procesu przygotowania produkcji oraz dystrybucji. Wśród współczesnych systemów wytwórczych wyróżnia się [11]:

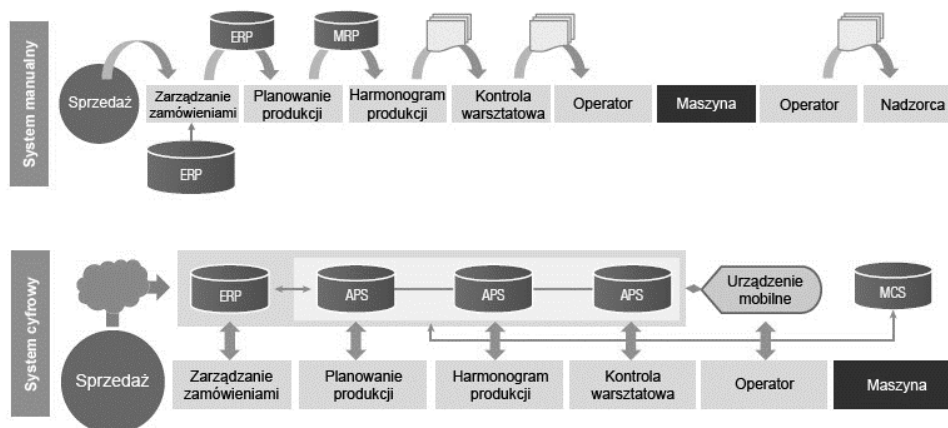
- niezależne, sterowane komputerowo stanowiska obróbkowe i montażowe,
- elastyczne systemy wytwórcze FMS (ang. *Flexible Manufacturing Systems*),
- komputerowo wspomagane systemy wytwórcze oparte na systemach CAM (ang. *Computer Aided Manufacturing*),
- komputerowo zintegrowane systemy wytwórcze oparte na systemach CIM (ang. *Computer Integrated Manufacturing*).

Każdy z powyższych systemów wytwarzania realizuje procesy wytwarzania, kontroli, transportu i składowania umożliwiając dodatkowo sterowanie w zakresie wytwarzania, kontrolę jakości wyrobów oraz diagnostykę maszyn, urządzeń i narzędzi.

Zastosowanie nowoczesnych i niezależnych stanowisk obróbkowych i montażowych wymuszone zostało postępowaniem technicznym i organizacyjnym. Zastąpiły bardziej uciążliwe, mało wydajne i wysłużone stanowiska robocze. Ich cechą charakterystyczną jest ultranowoczesne wyposażenie technologiczne, sterowanie numeryczne, automatyczny zasobnik półwyrobów oraz automatyczna wymiana obrabianych przedmiotów. Stanowiska tego typu zapewniają wyraźne skrócenie czasu obróbki w stosunku do metod tradycyjnych, poprawienie warunków i bezpieczeństwa pracy. Nie przynoszą jednak efektów ekonomicznych w postaci wzrostu produktywności, ani obniżki kosztów wytwarzania [11]. Wynika z tego, że nowoczesne niezależne stanowiska obróbkowe i montażowe stanowią etap przejściowy do dalszej automatyzacji i organizacji produkcji w postaci elastycznych, zautomatyzowanych, inteligentnych systemów wytwórczych.

W XXI wieku obserwowane zmiany ewolucyjne w przemyśle postępują od industrializacji o charakterze elektroniczno-informatycznym do systemów wytwórczych nowej generacji (NGMS, ang. *Next Generation Manufacturing System*) zwanych także inteligentnymi. Nowa generacja technologiczna w sferze wytwarzania, określana jako Przemysł 4.0, zmierza w kierunku projektowania systemów wytwórczych integrujących przetwarzanie informacji z przetwarzaniem materii. Kierunek ten można określić mianem „digitalizacji materii”, a jego założenia urzeczywistniają inteligentne fabryki sterowane systemami cyberfizycznymi CPS (ang. *Cyber-Physical System*) w środowisku internetu przedmiotów IoT (ang. *Internet of Things*).

Cyfrowa produkcja jest pojęciem stosowanym do opisu zintegrowanego wykorzystania automatycznych systemów, procesów i narzędzi przez przedsiębiorstwa projektowe i produkcyjne w celu dostarczania produktów do klientów w możliwie najkrótszym czasie i przy minimalnej interwencji operatorów [12].



Rys. 3. Zintegrowane operacje cyfrowego wytwarzania
Źródło: opracowanie na podst. [13]

Cyfrowe modelowanie procesów przetwarzania materii pozwala na transformację dóbr materialnych, zintegrowanych informacyjnie, w ramach systemu komputerowego wspomaganie organizacji produkcji (rys. 3). Innymi słowami mówiąc: dobra materialne, podlegając cyfryzacji, stają się w coraz większym stopniu dobrami cyfrowymi [14]. Ten megatrend cywilizacyjny, od strony IT postrzegany jest w postaci wirtualizacji [15]. Z drugiej strony na genezę Przemysłu 4.0 wpływa cykliczność rozwoju gospodarki

i pojawianie się okresów przesilen, w których występuje zwiększona potrzeba podejmowania ryzyka oraz poszukiwania nowych rozwiązań technologicznych dla zapewnienia wzrostu produktywności przedsiębiorstw. Takich rezultatów nie daje już komputeryzacja przemysłu metodami charakterystycznymi dla paradygmatu generacji przemysłowej 3.0 (czyli industrializacji elektroniczno-informatycznej) charakterystycznej dla drugiej połowy XX wieku.

4. Wnioski i kierunki dalszych badań

Sukcesywne przekształcanie elastycznych systemów wytwórczych w coraz to bardziej inteligentne przy wykorzystaniu CPS umożliwi w przyszłości sprzężenie systemów wirtualnych z fizycznymi, prezentując tym samym nowy poziom zintegrowanej inteligencji, charakteryzującej się interakcją i koordynacją procesów obliczeniowych z procesami fizycznymi w czasie rzeczywistym. Według Plattform Industrie 4.0 [16] będzie to miało zasadniczy wpływ na tworzenie wartości, modele biznesowe, usługi pochodne (niższego szczebla) oraz organizację pracy, a te wymuszą na współczesnych przedsiębiorstwach produkcyjnych podejmowanie działań w zakresie: (1) integracji poziomej za pośrednictwem sieci wartości, (2) kompleksowej cyfrowej integracji inżynierii w całym łańcuchu wartości, jak również (3) integracji pionowej i sieciowej systemów wytwórczych.

Systemy wytwórcze nowej generacji można określać mianem informacyjnych, ponieważ w coraz większym stopniu przetwarzają one materię poddawaną procesom cyfryzacji. Jednym z centralnych zagadnień Przemysłu 4.0 jest zatem optymalizacja jego sfery IT, która zauważalna jest również w związkach fabryki z jej otoczeniem a więc szerzej uwzględniając ewolucyjne zmiany: paradygmatów zarządzania i referencyjnych metod implementacji projektów IT. Ich dynamika implikuje kontynuowanie badań, których kierunki wyznaczają trendy współczesnej techniki i osiągnięć innowacyjnych [14]:

- trendy ekonomii sieciowej społeczeństwa informacyjnego: internet przedmiotów, bioorganizacje, informatyka emocjonalna [17],
- prognozowanie technologii dyfuzyjnych IT: sieci semantyczne, ontologiczne bazy danych, kludonomika (ang. *cloudonomics*) [18],
- fabryka przyszłości: fabrykatory 3D, wirtualna wytwórczość, inteligencja holoniczna, sterowanie urządzeń głosem [19].

Formy organizacji elastycznego wytwarzania niewątpliwie ewoluują w kierunku cyfrowej produkcji o charakterze autonomicznym i samouczącym się. Zjawisko to jest nierozdzielnie związane z postępem technicznym, informatycznym, stopniem zaawansowania rozwoju metod sztucznej inteligencji i ich skutecznej adaptacji dla potrzeb inteligentnych systemów produkcyjnych. W zastosowaniach przemysłowych wyróżnić należy elastyczność miękką (ang. *weak*) i twardą (ang. *hard*). W pierwszym z tych obszarów sytuują się holonowe systemy produkcyjne HMS (ang. *Holon Manufacturing System*), głównie z uwagi na ich ograniczenia fizyczne. Paradoksalnie wiąże się to z ich większym zaawansowaniem praktycznym w stosunku do drugiej grupy, w której można wyróżnić bioniczne systemy produkcyjne BMS (ang. *Bionic Manufacturing System*), traktujące system wytwórczy ewolucyjnie i samoorganizacyjnie, oraz systemy fraktalne (ang. *Fractal Manufacturing System*), które doszukują się w fabryce wzorów rekurencyjnych. Współcześnie bardzo obiecującym podejściem dla adaptacji FMS w kierunku cyfrowej produkcji wydaje się być rozszerzenie modelu HMS o cechy BMS, tak aby holarchii nadawać dynamiczne cechy samorozwojowe [1].

Literatura

1. Zawadzka L.: Współczesne problemy i kierunki rozwoju elastycznych systemów produkcyjnych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2007.
2. Afentakis P.: A model for layout design in FMS. [in:] Kusiak A. (ed.), Flexible Manufacturing Systems: Methods and Studies, North Holland, Amsterdam 1986, 127-139.
3. Banaszak Z., Muszyński W.: Systemy elastycznej automatyzacji dyskretnych procesów produkcyjnych. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1991.
4. Gartner, Inc.: <http://www.gartner.com/newsroom> (dostęp on-line 16.01.2017).
5. Krzyżanowski J.: Elastyczna automatyzacja wytwarzania. <http://www.controlengineering.pl/menu-gorne/artukul/article/elastyczna-automatyzacja-wytwarzania> (dostęp on-line 16.01.2017).
6. Honczarenko J.: Elastyczna automatyzacja czynnikiem zwiększania produktywności wytwarzania. *Mechanik*, 82 (7), 2009, 583-586.
7. OPC Foundation: <http://www.opcfoundation.org>.
8. Extensible Markup Language: <http://www.w3.org/XML>.
9. Klemiato M., Augustyn J., Duda J.T., Sterna K.: INSTEPRO: Zintegrowany system sterowania produkcją (1). *Pomiary Automatyka Robotyka*, 4, 2011, 70-75.
10. Zumbach Electronic: OPC UA – Overview. <http://www.zumbach.com/products/product-finder/opc-ua/opc-ua-overview.html> (dostęp on-line 12.01.2017).
11. Durlik I.: Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych. Część I i II, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa 1996.
12. Andrews C.: Introduction to digital manufacturing. University of Strathclyde, <http://www.futuresme.eu> (dostęp on-line 16.01.2017).
13. Capgemini Consulting Analysis: Operational excellence through digital in manufacturing industries. https://www.capgemini-consulting.com/resource-file-access/resource/pdf/operational_excellence_goes_digital_29_07_final.pdf (dostęp on-line 12.01.2017).
14. Badurek J.: Systemy ERP dla wytwórczości nowej generacji. *Przedsiębiorstwo we współczesnej gospodarce – teoria i praktyka*, 2, 2014, 79-90.
15. Canetta L.: Digital factory for human-oriented production systems. Springer, London 2011.
16. Plattform Industrie 4.0: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the INDUSTRIE 4.0 Working Group, Frankfurt 2013, <http://www.plattform-i40.de> (dostęp on-line 12.01.2017).
17. Palachaud C. (ed.): Emotion-oriented systems. John Wiley & Sons, Hoboken, 2013.
18. Weinmann J.: Cloudonomics – the business value of cloud computing. John Wiley & Sons, Hoboken 2013.
19. McTear F.M., Callejas Z.: Voice application development for Android. Pact Publishing, Birmingham 2013.

Dr inż. Iwona ŁAPUŃKA

Dr inż. Katarzyna MAREK-KOŁODZIEJ

Dr inż. Piotr WITTBRODT

Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów

Politechnika Opolska

45-370 Opole, ul. Ozimska 75

tel.: (+48 77) 449 88 45

e-mail: i.lapunka@po.opole.pl

k.marek-kolodziej@po.opole.pl

p.wittbrodt@po.opole.pl