

Andrzej Kamiński*

„Inteligentna fabryka” – nowe trendy w rozwoju systemów informatycznych dla przemysłu

Wstęp

W artykule zostały przedstawione koncepcja inteligentnej fabryki oraz rozwiązania aplikacyjne związane z zastosowaniem systemów cyber-fizycznych w przemyśle. Celem pracy jest omówienie nowych trendów w rozwoju systemów informatycznych wspomagających monitorowanie, sterowanie i diagnostykę procesów produkcyjnych. W ujęciu szczegółowym przedstawiono: wybrane inicjatywy związane z wdrażaniem koncepcji „Przemysł 4.0” w krajach Unii Europejskiej, strategiczne obszary informatyzacji przemysłu, a także kierunki prac badawczo-rozwojowych związanych z projektowaniem nowej generacji systemów cyber-fizycznych. Wskazano również potencjalne możliwości wykorzystania technologii systemów eksperckich oraz rozwiązań klasy Business Intelligence na potrzeby komputerowego wspomaganie procedur diagnostyki przemysłowej. Sformułowano misję, ramowe założenia funkcjonalne oraz perspektywiczne korzyści związane z praktycznym zastosowaniem nowo opracowanego systemu w przemyśle. Program badań przemysłowych, którego celem było opracowanie prototypu diagnostycznego systemu doradczego, został zrealizowany w ramach projektu współfinansowanego z funduszy Unii Europejskiej POIG.01.03.01-14-059/12.

1. „Przemysł 4.0” jako strategiczny program rozwoju przedsiębiorstw produkcyjnych w Unii Europejskiej

Koncepcja „Przemysł 4.0” oznacza nowe podejście do produkcji, wspomaganą odtąd inteligentnymi systemami informatycznymi w obszarze planowania, monitorowania i kontroli procesów technologicznych i wytwórczych oraz podejmowania decyzji na poziomie strategicznym, taktycznym i operacyjnym. Prekursorem prac badawczych związanych z opracowaniem koncepcji metodycznej „Przemysł 4.0” jest Federalne Ministerstwo Edukacji i Badań Naukowych w Niemczech. Założenia programowe nowo opracowanej koncepcji stanowią integralny element „Nowej strategii zaawansowanych technologii dla Niemiec” [The new High-Tech

* Dr inż., Kolegium Analiz Ekonomicznych, Instytut Informatyki i Gospodarki Cyfrowej, Szkoła Główna Handlowa w Warszawie, al. Niepodległości 162, 02-554 Warszawa, andrzej.kaminski@sgh.waw.pl

Strategy..., 2014, s. 16], mającej na celu rozwój niemieckiego przemysłu wytwórczego poprzez kompleksową robotyzację, automatyzację oraz komputerową integrację produkcji. Dokument ten był rezultatem prac grupy eksperckiej złożonej z przedstawicieli nauki i przemysłu. Strategia obejmuje m.in. analizę i ocenę kondycji niemieckiej gospodarki, wyznacza kluczowe kierunki rozwoju związane z szeroko rozumianym zastosowaniem technologii ICT, zawiera konkretne rekomendacje i zalecenia aplikacyjne, a także inicjuje kolejne przedsięwzięcia badawczo-rozwojowe.

Przykładowo, program horyzontalny „Agenda Cyber-Physical Systems” (2013–2025) obejmuje uruchomienie zintegrowanego programu badań przemysłowych związanych z rozwojem nowej generacji systemów cyber-fizycznych oraz ich praktycznym zastosowaniem w kluczowych obszarach gospodarki [Geisberger, Broy, 2012]. Celem tego programu jest rozwój systemów cyber-fizycznych w czterech strategicznych sektorach: energetyka (inteligentne sieci elektro-energetyczne), mobilność (sieci szerokopasmowe), zdrowie (telemedycyna), przemysł (inteligentne fabryki).

Kontynuację prac badawczo-rozwojowych w obszarze systemów cyber-fizycznych stanowi projekt „CyProS Cyber-Physical Production Systems” [CyProS, 2018]. Celem projektu jest realizacja prac związanych z projektowaniem i implementacją architektury referencyjnej systemów cyber-fizycznych w obszarze produkcji i logistyki przemysłowej. Pod pojęciem architektury referencyjnej należy rozumieć architekturę opracowaną dla określonej dziedziny zastosowań i stanowiącą szablon wielokrotnego użytku [Gabryelczyk, Lasek, 1999, s. 29–39]. Taka architektura ma często ogólnikowy charakter i jest matrycą, na podstawie której konstruowane są rozwiązania architektoniczne dla indywidualnych zastosowań w przedsiębiorstwach przemysłowych.

Projekt ten obejmuje następujące etapy prac badawczych:

- 1) opracowanie architektury i reprezentatywnego zbioru modułów funkcjonalnych systemu cyber-fizycznego na potrzeby praktycznego zastosowania w obszarach produkcji i logistyki;
- 2) opracowanie uniwersalnych platform, narzędzi, środowisk programistyczno-projektowych w celu tworzenia nowej generacji cyber-fizycznych systemów produkcyjnych;
- 3) opracowanie metodyki wdrożeń tej kategorii systemów w realnych warunkach przemysłowych oraz realizacja projektów pilotażowych.

W Polsce pierwszą inicjatywą na rzecz wdrożenia koncepcji „Przemysł 4.0” jest uruchomienie strategicznego programu rządowego „Platforma Przemysłu Przyszłości”. Celem tego przedsięwzięcia jest wsparcie procesu transformacji cyfrowej polskiego przemysłu. Do zadań nowego

podmiotu będzie należało m.in. inicjowanie nowych przedsięwzięć badawczo-rozwojowych, wsparcie dla przyszłych beneficjentów oraz koordynacja działań wielu jednostek, w tym administracji publicznej, instytutów naukowo-badawczych oraz przedsiębiorstw przemysłowych [Platforma Przemysłu Przyszłości, 2018].

Wdrożenie strategii „Przemysł 4.0” umożliwi efektywny wzrost produktywności polskiej gospodarki. Z kolei bierność wobec czwartej rewolucji przemysłowej może spowodować marginalizację krajowego przemysłu. Tym samym prace badawczo-rozwojowe związane z projektowaniem rozwiązań informatycznych w ramach „Przemysł 4.0” należy traktować jako działania strategiczne w wymiarze regionalnym oraz w wymiarze zintegrowanej gospodarki krajów Unii Europejskiej.

2. Koncepcja „inteligentnej fabryki”

„Przemysł 4.0” zakłada szeroko rozumianą integrację, koordynację i współpracę autonomicznych maszyn, robotów oraz różnych klas i generacji systemów transakcyjnych i analitycznych (rys. 1).

Rysunek 1. Obszary prac badawczych w perspektywie „Przemysł 4.0”



Źródło: Opracowanie własne.

Do kluczowych kierunków prac badawczo-rozwojowych istotnych w perspektywie „Przemysł 4.0” należy zaliczyć: systemy cyber-fizyczne (*cyber-physical system*), Internet rzeczy (*IoT, Internet of Things*), produkcję addytywną (*additive manufacturing*), systemy zarządzania dużymi

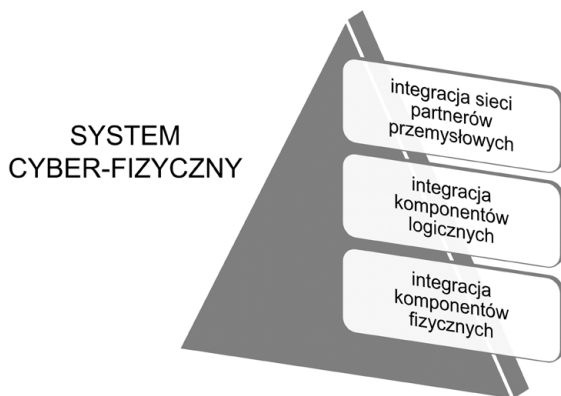
wolumenami danych przemysłowych (*Big-Data*), systemy wirtualnej rzeczywistości (*virtual reality*), systemy sztucznej inteligencji (*artificial intelligence*), technologie przetwarzania danych w chmurze obliczeniowej (*cloud computing*), analitykę predykcyjną (*predictive analytics*).

Fundamentem strategii „Przemysł 4.0” jest tzw. inteligentna fabryka (*smart factory*). Koncepcja inteligentnej fabryki obejmuje proces integracji technicznych środków produkcji (tj. park maszynowy, linie produkcyjne, infrastruktura przemysłowa, środki transportu) oraz systemów cyber-fizycznych wspomagających procesy operacyjne i zarządcze. Celem tych działań jest uzyskanie pełnej autonomiczności operacji sterowania, monitorowania i kontroli produkcji w drodze bezpośredniej wymiany danych i komunikatów pomiędzy różnymi maszynami i robotami przemysłowymi oraz zastosowanie nowej generacji systemów informatycznych wykorzystujących rozwiązania sztucznej inteligencji. Zamierzonym efektem ekonomicznym jest redukcja kosztów przestoju technologicznych oraz wyższa elastyczność i adaptacyjność procesów produkcyjnych w funkcji dynamicznie zmieniających się warunków brzegowych oraz złożoności otoczenia zewnętrznego. Rozwiązanie to umożliwi współdziałanie kooperantów i partnerów przemysłowych.

W perspektywie „Przemysł 4.0” przedsiębiorstwa przemysłowe będą ewoluować w kierunku organizacji o strukturze rozproszonej. Podstawą ich funkcjonowania będzie wykorzystanie nowej generacji systemów cyber-fizycznych.

W literaturze przedmiotu pojęcie systemu cyber-fizycznego jest złożone i wieloznaczne. Przykładowo, w pracy [Broy, 2010, s. 17] Autor wskazuje, że istotą systemu cyber-fizycznego jest kontrola tzw. procesów fizycznych w fabryce za pomocą sieci czujników przemysłowych, a także zdalne monitorowanie tych procesów poprzez globalną sieć cyfrową. Z kolei w artykule [Kagermann i inni, 2013, s. 84] Autorzy podkreślają, że system cyber-fizyczny umożliwia efektywną koordynację czynników i środków produkcji za pomocą systemów informatycznych, a także – co ważniejsze – praktycznie nieograniczony dostęp do rozproszonych danych przemysłowych.

W odniesieniu do przemysłu system cyber-fizyczny można postrzegać jako rozwiązanie integrujące systemy sterowania maszynami, urządzeniami i robotami oraz inteligentne systemy informatyczne wspomagające funkcje operacyjne i zarządcze. System cyber-fizyczny można też rozpatrywać jako rozwiązanie integrujące komponenty fizyczne, komponenty logiczne oraz sieci partnerów przemysłowych (rys. 2).

Rysunek 2. System cyber-fizyczny w perspektywie „Przemysł 4.0”

Źródło: Opracowanie własne.

Podstawą funkcjonowania systemu cyber-fizycznego jest proces ciągłej detekcji i lokalizacji sygnałów pochodzących z sieci czujników przemysłowych. Proces sterowania odbywa się z kolei poprzez automatyczne uruchamianie odpowiednich operacji technologicznych, za pomocą powiązanych siłowników elektrycznych, pneumatycznych, hydraulicznych (integracja komponentów fizycznych).

Realizacja procesów technologicznych i wytwórczych będzie nadzorowana za pomocą nowej generacji specjalistycznych systemów informatycznych (integracja komponentów logicznych). Systemy te, oprócz funkcjonalności w obszarze wspomagania typowych operacji transakcyjnych, będą wyposażone w inteligentne moduły wspomagające podejmowanie decyzji w oparciu o bazy wiedzy eksperckiej, a także funkcje prognostyczne (techniki uczenia maszynowego).

Należy zwrócić uwagę, że obecnie stosowane zintegrowane systemy informatyczne klasy MRP/ERP zostały opracowane na potrzeby komputerowego wspomagania procesów gospodarczych w obszarze pojedynczego przedsiębiorstwa. Natomiast zgodnie z paradygmatem koncepcji „Przemysł 4.0” systemy cyber-fizyczne będą funkcjonować w środowisku wirtualnym i rozproszonym, co umożliwi współdziałanie grupy niezależnych przedsiębiorstw partnerskich zintegrowanych w procesie wytwórczym (integracja sieci partnerów przemysłowych).

Systemy cyber-fizyczne cechuje: interoperacyjność (współdziałanie na różnych, wzajemnie niekompatybilnych platformach), inteligencja (wykorzystanie metod, technik i narzędzi sztucznej inteligencji), autonomiczność (automatyzacja procesów sterowania z wykorzystaniem heurystyk, reguł decyzyjnych i technik uczenia maszynowego), elastyczność

(parametryzacja funkcjonalna sterowników, protokołów i pakietów oprogramowania aplikacyjnego), otwartość (wymiana danych pomiędzy różnymi, wzajemnie niekompatybilnymi systemami automatyki przemysłowej, robotami oraz aplikacjami komputerowymi, tworzącymi złożony ekosystem produkcyjny).

Immanentnym elementem koncepcji inteligentnej fabryki jest pojęcie „przemysłowego Internetu rzeczy” (*Industrial Internet of Things*). Mianem „Internet rzeczy” określane jest połączenie obiektów fizycznych (rzeczy) z ich wirtualną reprezentacją w globalnej sieci komputerowej (Internet). Automatyczna identyfikacja obiektów fizycznych w sieci odbywa się z wykorzystaniem technologii RFID. Za pomocą czujników i sensorów możliwa jest automatyczna detekcja stanu urządzenia, bieżący odczyt parametrów technologicznych, przekazanie sygnałów sterowniczych oraz wymiana komunikatów i współpraca z innymi urządzeniami powiązаныmi za pomocą sieci bezprzewodowych [Atzori i inni, 2010, s. 2787–2805; Vermesan, Friess, 2014, s. 11–15; Wortmann, Fluchter, 2015, s. 222–223]. Pojęcie „przemysłowego Internetu rzeczy” odnosi się do połączenia fizycznych elementów systemów produkcyjnych (maszyn, urządzeń, stanowisk pracy) na potrzeby realizacji złożonych procesów technologicznych i wytwórczych [Gilchrist, 2016, s. 87]. Kluczową innowacją tej kategorii rozwiązań jest tworzenie wirtualnych systemów produkcyjnych. Systemy te nie posiadają sformalizowanej topologii połączeń sieciowych. Przeciwnie, w funkcji realizacji bieżących zleceń, dostępności zasobów wytwórczych oraz planowanego i rzeczywistego obciążenia maszyn technologicznych tworzone są pule dynamicznych połączeń pomiędzy poszczególnymi elementami systemu produkcyjnego.

Rozwiązania aplikacyjne bazujące na koncepcji „przemysłowego Internetu rzeczy” mogą znaleźć praktyczne zastosowania w procesie inteligentnej diagnostyki obrabiarek. W trakcie normalnej eksploatacji maszyny poziom drgań mechanicznych może przekroczyć dopuszczalne, bezpieczne wartości normatywne, np. z powodu niewyważenia, niewspółosiowości lub rezonansów (zalecane wartości graniczne naprężeń wywoływanych przez drgania określone są w normach ISO 10816 oraz ISO 14694). Wzrost amplitudy drgań ma niekorzystny wpływ na stan techniczny obrabiarki i skraca jej żywotność. Inteligentna diagnostyka poziomu drgań obrabiarki może być przeprowadzona za pomocą pakietu System Efector Octavis [Holub, Hammer, 2017, s. 2095–2097]. Pakiet ten umożliwia wczesne wykrywanie powstałych uszkodzeń, a tym samym eliminację (znaczne ograniczenie) awarii oraz redukcję kosztów przestojów i prac remontowo-naprawczych. W ujęciu szczegółowym system czujników przemysłowych montowany jest na obudowie wrzeczona maszyny. Dane z czujników poddawane są

bieżącej analizie, sygnalizowane są wszelkie anomalie i przekroczenia dopuszczalnego poziomu drgań, możliwa jest również transmisja danych do systemów nadzorujących pracę automatyki przemysłowej. W dalszej perspektywie można rozważyć opracowanie inteligentnego systemu sterowania, który na podstawie zaimplementowanych reguł decyzyjnych automatycznie korygowałby parametry pracy grupy obrabiarek powiązanych w procesie wytwórczym. Niewątpliwie wdrożenie tej kategorii rozwiązań bezpośrednio przełoży się na poprawę dostępności obrabiarek, usprawni realizację procesów produkcyjnych, a także zredukuje liczbę awarii, napraw oraz kosztów serwisu i części zamiennych.

Konkludując powyższe rozważania, prace badawczo-rozwojowe związane z opracowaniem koncepcji inteligentnej fabryki cechuje innowacyjność oraz interdyscyplinarność, co stwarza szerokie spektrum do współpracy krajowych i międzynarodowych przedsiębiorstw przemysłowych oraz ośrodków akademickich.

2. Inteligentna diagnostyka procesów przemysłowych

Koncepcja budowy inteligentnej fabryki za pomocą nowej generacji systemów cyber-fizycznych obejmuje również informatyzację procedur diagnostyki przemysłowej.

Misję zintegrowanego systemu wspomagającego procedury diagnostyki przemysłowej stanowi wielokryterialna analiza i ocena procesów produkcyjnych i środowiskowych, w szczególności maszyn, urządzeń i stanowisk pracy. Projekt został zrealizowany w ramach programu badań przemysłowych POIG.01.03.01-14-059/12, który został dofinansowany z funduszy Unii Europejskiej.

W ramach projektu zostały opracowane wielokryterialne modele informacyjno-decyzyjne na potrzeby analizy ryzyk zawodowych, psychofizycznych obciążeń związanych z wykonywaną pracą, czynników środowiskowych. Celem prac badawczych było opracowanie rozwiązań analitycznych wspomagających szacowanie kosztów przestoju związanych z wypadkowością i absencją chorobową, kosztów wypłaconych odszkodowań oraz kosztów leczenia dolegliwości i chorób zawodowych. Zastosowanie technologii Business Intelligence umożliwiło wielokryterialną analizę zdarzeń gospodarczych w odniesieniu do zakładu, wydziału, linii technologicznej, czy też grupy stanowisk pracy. Uzyskanie miarodajnych zestawień i statystyk jest możliwe za pomocą komputerowej ewidencji procesów produkcyjnych, procesów pracy, a także procesów związanych z bezpieczeństwem oraz materialnym środowiskiem pracy. Efektywne wykorzystanie technologii Business Intelligence umożliwiło wielokryterialną analizę danych faktograficznych związanych z rzeczywistym obciążeniem pracowników

w procesach pracy z uwzględnieniem uciążliwości, zagrożeń wypadkowych oraz czynników potencjalnie niebezpiecznych i szkodliwych.

Komputerowe wspomaganie procedur tzw. inteligentnej diagnozy stwarza możliwość praktycznego zastosowania technologii systemów eksperckich. Systemy te mogą zostać efektywnie wykorzystane w przemyśle, np. w procesie analizy i oceny ryzyka zawodowego. Zgodnie z art. 226 Kodeksu pracy każdy pracodawca jest zobowiązany przeprowadzić analizę i ocenę ryzyka zawodowych. Podstawowe zasady przeprowadzania oceny ryzyka zawodowego znajdują się w normie PN-N-18002:2011 „Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy”. Jednakże dokument ten nie zawiera procedur postępowania, a jedynie ramowe zalecenia i wytyczne. Krajowe przedsiębiorstwa dysponują ograniczonymi środkami na zlecenie kosztownych opinii i raportów doradczych. Istnieje zatem realne zapotrzebowanie rynku na wdrażanie rozwiązań informatyczno-decyzyjnych wspomagających procesy diagnostyczne.

W ramach projektu zostały przeprowadzone badania przemysłowe związane z identyfikacją, formalizacją i kodyfikacją zbioru czynników diagnostycznych, opracowane zostały bazy wiedzy z zakresu organizacji produkcji, bezpieczeństwa pracy i eksploatacji maszyn, ergonomii przemysłowej, a także mechanizm wnioskowania heurystycznego i zbiór reguł decyzyjnych.

Do podstawowych korzyści z wdrożenia zintegrowanego systemu wspomagającego procedury diagnostyki przemysłowej można zaliczyć: korzyści organizacyjne (zmniejszenie liczby wypadków i urazów przy pracy, wzrost wydajności pracy, identyfikacja zagrożeń i szybkie przeciwdziałanie tym zagrożeniom w przyszłości), a także korzyści ekonomiczne (ograniczenie kosztów związanych z przestojami, wypadkami, chorobami zawodowymi oraz wypłatą potencjalnych odszkodowań, świadczeń, kar umownych, zmniejszenie kosztów pracy, preferencje w pozyskiwaniu dotacji na inwestycje i modernizacje).

Zakończenie

Podstawą funkcjonowania inteligentnej fabryki będzie wykorzystanie nowej generacji systemów cyber-fizycznych. Systemy te będą projektowane w architekturze rozproszonej (*distributed systems*), cechować je będzie: interoperacyjność, inteligencja, autonomiczność, elastyczność oraz otwartość. Systemy te wykorzystywać będą metody i techniki sztucznej inteligencji zarówno na potrzeby realizacji bieżących operacji sterowania, monitorowania i kontroli produkcji, jak również na potrzeby wielokryterialnej analizy danych historycznych, symulacji i prognozowania.

Realizacja prac badawczo-rozwojowych dotyczących projektowania rozwiązań aplikacyjnych wspierających funkcjonowanie inteligentnej fabryki wpisuje się w programy horyzontalne Unii Europejskiej, a w szczególności w strategię rozwoju koncepcji „Przemysł 4.0” w Polsce i w Niemczech.

Literatura

- Atzori L., Iera A., Morabito G. (2010), *The Internet of Things: A survey*, „Computer Networks”, Vol. 54, No. 15.
- Broy M. (2010), *Cyber-Physical Systems. Innovation Durch Software-Intensive Eingebettete Systeme*, Springer, Monachium.
- Cyber-Physische Produktionssysteme (CyProS)*, <http://www.projekt-cypros.de/projekt-cypros-cps.html>, dostęp: 20.10.2018.
- Gabryelczyk R., Lasek M. (1999), *Architektury zintegrowanych systemów informacyjnych przedsiębiorstw*, „Informatyka”, nr 1, SIGMA NOT.
- Geisberger E., Broy M. (2012), *Agenda CPS Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*, ACATECH – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- Gilchrist A. (2016), *The industrial Internet of things*, Apress, Thailand.
- Holub O., Hammer M. (2017), *Diagnostics and maintenance of machine tool spindles – new views*, „MM Science Journal”, December, <http://www.mmscience.eu>.
- Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. (2013), *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*, ACATECH – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- Platforma Przemysłu Przyszłości, <https://www.mpit.gov.pl/strony/zadania/reindustrializacja-gospodarki/czwarta-rewolucja-przemyslowa>, dostęp: 22.10.2018.
- The new High-Tech Strategy Innovations for Germany (2014), Federal Ministry of Education and Research (BMBF).
- Vermesan O., Friess P. (2014), *Internet of Things. From Research and Innovation to Market Deployment*, River Publishers, Denmark.
- Wortmann F., Fluchter K. (2015), *Internet of Things Technology and Value Added*, Business & Information Systems Engineering, Springer.

Streszczenie

Wyznacznikiem koncepcji inteligentnej fabryki jest informatyczne wsparcie procesów technologicznych, wytwórczych i środowiskowych na poziomie operacyjnym i zarządczym. W części teoretycznej artykułu omówiono wybrane elementy strategii „Przemysł 4.0”, a także wskazano perspektywiczne możliwości zastosowania nowej generacji systemów cyber-fizycznych w przedsiębiorstwie produkcyjnym. Część empiryczna pracy obejmuje analizę możliwości komputerowego wspomagania procedur diagnostyki przemysłowej za pomocą narzędzi przemysłowego Internetu rzeczy oraz inteligentnych systemów doradczych.

Słowa kluczowe

Przemysł 4.0, inteligentna fabryka, systemy cyber-fizyczne

„Intelligent Factory” – new trends in development information systems for industry (Summary)

The determinant of the concept of an intelligent factory is the computer support of technological, manufacturing and environmental processes at the operational and management level. The theoretical part of the article discusses selected elements of the „Industry 4.0” strategy, and also indicates the prospective possibilities of using the new generation of cyber-physical systems in a production enterprise. The empirical part of the work includes the analysis of the possibilities of computer-assisted industrial diagnostics procedures using the Industrial Internet of Things tools and intelligent advisory systems.

Keywords

Industry 4.0, intelligent factory, cyber-physical systems