

Konceptje i elementy inteligentnej fabryki przyszłości

The concepts and components of the smart factory

PIOTR SZULEWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.2.28>

Omówiono innowacje programowo-techniczne związane z koncepcją inteligentnej fabryki przyszłości, programy i systemy przeznaczone do monitorowania oraz zarządzania maszynami i liniami produkcyjnymi, a także działania podejmowane przez producentów obrabiarek w celu dostosowania swoich wyrobów do idei Industry 4.0, zaprezentowane na targach TMTS (Tajwan 2016).

SŁOWA KLUCZOWE: Industry 4.0, sterowniki obrabiarek CNC, monitorowanie, czujniki

The paper illuminates the innovation in software – technical issues related to the concept of intelligent factory presented at TMTS show (Taiwan 2016). Programs and systems for monitoring and management of machines and production lines. And independent actions taken by machine manufacturers to adapt their products to the idea of Industry 4.0.

KEYWORDS: Industry 4.0, machine CNC monitoring and supervision, sensors

Jak się wydaje, koncepcja Industry 4.0 (w Polsce nazywana także Przemysłem 4.0) staje się światowym standardem, do którego starają się dołączyć wszyscy liczący się wytwórcy maszyn i urządzeń technologicznych. Teoretycznie rzecz ujmując, idea ta polega na pełnej integracji produkcji/wytwarzania z szeroko pojętymi technologiami komunikacyjnymi. Efektem wprowadzenia tej koncepcji w życie mają być inteligentne/sprytne fabryki (*smart factories*) gdzie pracownicy, park maszynowy i realizowane procesy są efektywnie sprzęgnięte poprzez technologie informatyczne. Głównym celem tych działań jest zwiększenie wykorzystania zasobów (zmniejszenie kosztów produkcji), uzyskanie stabilności wytwarzania i uelastycznienie oferty produktowej [1]. Tak więc te innowacje mają się przyczynić do ograniczenia środków i czasu poświęcanych obecnie na produkcję.

Prace związane z wprowadzeniem idei Industry 4.0 są realizowane dwutorowo – poprzez odpowiednie systemy sprzętowe (sterowniki, kontrolery, czujniki), udostępniające różnorakie dane dotyczące wytwarzania, oraz systemy programowe odpowiedzialne za przesyłanie tych danych, ich przetwarzanie, archiwizowanie, a także wnioskowanie. W artykule przedstawiono takie właśnie produkty oferowane przez wytwórców z Tajwanu.

Obrabiarki

Spośród wielu prezentowanych obrabiarek uwagę zwracało pięcioosiowe, hybrydowe pionowe centrum obróbkowe iGT-800AM (marki Tongtai). Jest ono przeznaczone dla przemysłu lotniczego i samochodowego. Poza typową obróbką skrawaniem (pięć osi) umożliwia także napawanie laserowe oraz powierzchniową obróbkę cieplną (rys. 1). Wszystkie operacje są wykonywane na jednej



Rys. 1. Obrabiarka hybrydowa iGT-800AM marki Tongtai (źródło: www.tongtai.com.tw)

maszynie i w jednym zamocowaniu przedmiotu. Odpowiednia głowica jest pobierana z magazynu i mocowana we wrzecionie. Według producenta typowym zastosowaniem tej specjalizowanej obrabiarki może być szybka naprawa uszkodzonych części maszyn i urządzeń.

Jako bardzo istotne postrzegane jest zagadnienie wydzielania ciepła w trakcie procesu i przez pracującą podzespoły obrabiarek (odkształcenia termiczne). Firma Habor proponuje specjalizowane systemy chłodzenia dla wrzecion, zespołów śrub tocznych, napędów liniowych, chłodziwa i systemów zasilaczy hydraulicznych (rys. 2).



Rys. 2. Specjalizowany moduł chłodzący firmy Habor (źródło: www.habor.com)

Zaawansowane sterowanie oparte na cyfrowych regulatorach PID i przekształtnikach częstotliwości (falownikach) pozwala na stabilizację temperatury czynnika chłodzącego w zakresie $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Układy te mogą bezpośrednio współpracować z NC za pośrednictwem sieci Ethernet lub – w przypadku starszych obrabiarek – poprzez interfejs RS-485 [2].

Sterowniki CNC

Ciekawą ofertę zaproponował tajwański ITRI – Przemysłowy Instytut Badawczy (mający swoje laboratoria także w Europie). Promowany był nowo opracowany sterownik CNC model L2100 (rys. 3) wyposażony w dwa niezależne procesory (1,6 GHz-HMI i 0,8 GHz-Kernel), mogący kontrolować do 16 cyfrowych osi z rozdzielczością programową 1 μm , przy zachowaniu 1 ms pętli programowej. Komunikacja z napędami odbywa się za pomocą sieci

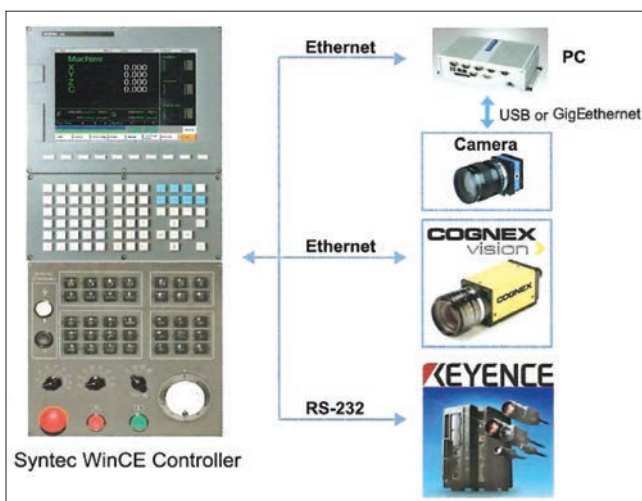
* Dr inż. Piotr Szulewski (maxer@cim.pw.edu.pl) – Instytut Techniki Wytwarzania, Politechnika Warszawska



Rys. 3. Sterownik CNC typ L2100 opracowany przez ITRI (źródło: www.itri.org.tw/eng)

EtherCat. Możliwości obliczeniowe kontrolera pozwalają na symultaniczne sterowanie centrum frezarskim i jednocześnie sześcioośmowym robotem (tradycyjnym, o strukturze przegubowej lub równoległej). Producent, doceniając elastyczność i popularność światowego standardu wymiany danych OPC UA [3], zaimplementował w strukturze sterownika odpowiedni serwer programowy, co znacznie ułatwia wymianę danych pomiędzy CNC a środowiskami nadzoru nad wytwarzaniem [4].

Firma Syntec to producent sterowników NC do centrów tokarskich, frezarskich oraz robotów. Własne oprogramowanie sterujące jest uruchamiane w środowisku Windows CE, co według firmy pozwala na określanie sterownika mianem systemu o architekturze otwartej (rys. 4). Syntec dostarcza narzędzia do samodzielnego konfigurowania panelu HMI przez końcowego użytkownika. Do komunikacji z napędami wykorzystywana jest specjalna magistrala Syntec serial Bus (Mechatrolink), dzięki czemu możliwe jest przeprowadzanie pełnej diagnostyki (online) napędów [5]. Interesującą własnością tego sterownika jest jego przygotowanie do bezpośredniej współpracy z systemami wizyjnymi. Wykonywana przez sterownik analiza obrazu z kamer (maksymalnie czterech) służy do orientowania przedmiotu obrabianego w przestrzeni i wypracowania odpowiedniej korekcji (przesunięcia lub kąta obrotu) dla



Rys. 4. Sterownik CNC typ 21MA firmy SYNTEC (źródło: www.syntec-club.com)

narzędzia. Producent deklaruje, że zapewnia to zwiększenie precyzji oraz jakości obróbki.

Kolejnym przykładem producenta obrabiarek, który proponuje swój własny sterownik NC, jest firma Chevalier. Wykorzystuje ona rdzeń sprzętowy kontrolera Fanuc, do którego dodaje oprogramowanie interfejsowe oraz sterujące – sterownik SMART-III (rys. 5). Z myślą o ułatwieniu i zwiększeniu intuicyjności obsługi oraz skróceniu wymaganego czasu szkolenia operatora firma propaguje maksymalne wykorzystanie grafiki oraz animacji w środowisku HMI.



Rys. 5. Szlifierka do płaszczyzn CNC firmy Chevalier (źródło: www.chevaliertw.com)

Również firma Goodway instaluje w produkowanych przez siebie obrabiarkach własny sterownik CNC (GLinc 350). Za bardzo istotny problem – zwłaszcza w warunkach przemysłowych, gdzie wytwarzany jest szeroki asortyment produktów – firma uważa unikanie kolizji (narzędzie–przedmiot, uchwyt–przedmiot itp.) i przeciwdziałanie im. Sterownik prowadzi stały monitoring i kontrolę pozycji wszystkich elementów ruchomych oraz toru ruchu narzędzia i w przypadkach niepewnych stara się podjąć działania związane z uniknięciem niebezpiecznej sytuacji (rys. 6). Wykorzystywana jest bardzo zaawansowana symulacja 3D i predykcja ruchów obrabiarki. Dzięki temu zapewniona jest bezkolizyjna obróbka i znaczna (o ok. 30%) redukcja czasu poświęcanego na testy programu obróbki przed rozpoczęciem produkcji.



Rys. 6. Sterownik CNC typ GLinc 350 firmy Goodway (źródło: www.goodwaycnc.com)

Oprogramowanie

Popularnym działaniem wytwórców obrabiarek jest instalowanie w środowisku komercyjnego sterownika NC własnych nakładek programowych. Takie oprogramowanie jest przeznaczone do konkretnego modelu maszyny. Pozwala ono na obserwowanie przez operatora specyficznych parametrów obróbki (obciążenia napędów i wrzeciona, stanu narzędzia, czasu obróbki itp.), a także ułatwia ręczne programowanie (m.in. kalkulatory, zarządzanie narzędziami, funkcje specjalne).

Przykładem może być firma KAFO. Podobnie działa firma YCM, która proponuje nakładkę programową do sterownika CNC. Aplikacja nazywa się iProMx i od strony funkcjonalno-graficznej jest zbliżona do interfejsu Celos firmy DMG Mori (rys. 7). Dzięki wspieraniu sieci Ethernet można gromadzić i analizować dane z poszczególnych obrabiarek. Środowisko Smart Factory wspiera podstawowe sterowniki NC (Siemens, Fanuc i Heidenhain). Zakres prezentowanych i przetwarzanych danych jest uzależniony od rodzaju użytkownika i oferuje zestawienia pokazujące odpowiednio:

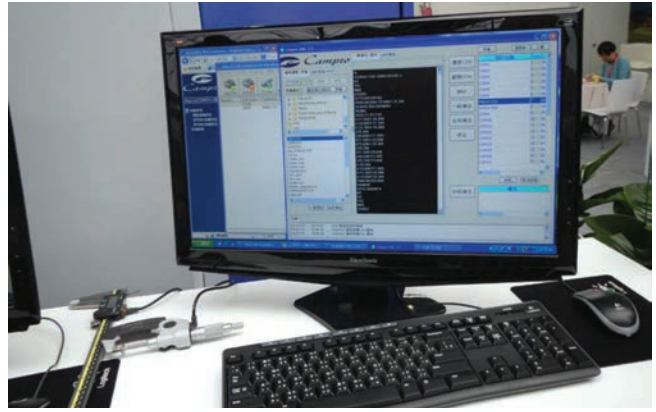
- dla użytkownika – czasy wykonania wyrobu, aktualny status obróbki, liczbę sztuk itp.,
- dla produkcji – realizowane zlecenie, stan jego wykonania, kondycję parku maszynowego itp.,
- dla zarządzania – wykorzystanie parku maszynowego, efektywność poszczególnych maszyn, realizację produkcji, gospodarkę narzędziową itp.,
- dla serwisu – stan obrabiarki, diagnostykę, zużycie energii, konieczne przeglądy itp.



Rys. 7. Sterownik iProMx firmy YCM (źródło: www.ycmcnc.com)

Firma oferuje również oprogramowanie i-Operation Plus II. Jest to nakładka programowa na sterownik NC, która rozbudowuje jego funkcjonalność o zarządzanie gospodarką narzędziową, automatyczne ustawianie narzędzi, obsługę sondy przedmiotowej (pomiar inspekcyjne), obsługę okresową itp. Dodatkowo YCM ma własny system zdalnego monitorowania stanu obrabiarek – i-Direct. Jedną z opcji jest obsługa urządzeń mobilnych jako przenośnych monitorów dla operatorów.

Firma CAMPRO, producent obrabiarek (centrów frezarskich), proponuje do swoich wyrobów dodatkowe oprogramowanie pozwalające na zdalne monitorowanie stanu obrabiarki za pośrednictwem sieci Ethernet i urządzeń mobilnych (smartfonów). Możliwe jest zapisywanie wszystkich komunikatów i zmiennych z NC, a także bieżąca lub późniejsza ich analiza. Ciekawą opcją jest wspieranie operatora w czasie wykonywania pomiarów



Rys. 8. Środowisko e-Management firmy Campro (źródło: www.campro.com.tw)

kontrolnych wielkości geometrycznych. Oferowane środowisko e-Management (rys. 8) pozwala na bezpośrednie dołączenie do systemu informatycznego zakładu narzędzi pomiarowych (suwmiarek, mikrometrów itp.) wyposażonych w interfejsy RS232C lub USB. Zapisane wyniki pomiarów mogą być udostępniane innym systemom (np. QMS) lub przetwarzane na miejscu.

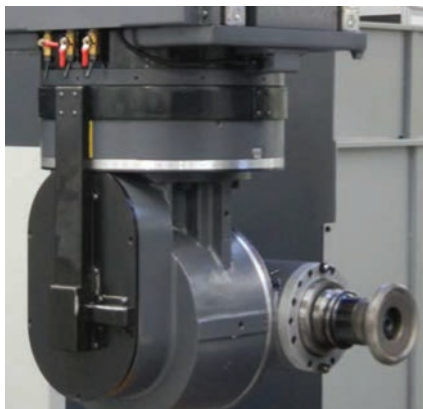
Producent pięcioosiowych, wielkorozmiarowych frezarek portalowych – SIGMA CNC – w swoich działaniach i produktach (rys. 9) prezentuje pogląd, że aby uzyskać na obrabiarce skrawającej wyrób najwyższej jakości, konieczne jest spełnienie pięciu głównych wymogów dotyczących:

- konstrukcji obrabiarki – dużej sztywności struktury, odporności na zmiany temperatury,
- wrzeciona – powinno być wysoko obrotowe, sztywne, z minimalnym biciem promieniowym i osiowym,
- doboru narzędzi skrawających,
- precyzyjnego sterownika CNC,
- programu klasy TPM (*total productive maintenance*) zarządzającego produkcją.



Rys. 9. Portalowa frezarka pięcioosiowa SCR-H firmy Sigma (źródło: www.sigmacnc.com.tw)

W celu poprawy jakości powierzchni obrabianego przedmiotu w obrotowej głowicy na wrzecionie instalowany jest standardowo czujnik monitorujący poziom wibracji podczas obróbki (rys. 10). W przypadku przekroczenia dopuszczalnego poziomu drgań sterownik modyfikuje prędkość obrotową wrzeciona aż do spadku ich amplitudy. Firma opracowała oprogramowanie (superCUPID) pozwalające na zdalny dostęp do sterownika NC obrabiarki. Realizuje ono sześć podzadań, umożliwiając: podgląd alarmów i komunikatów, statusu pracy i aktualnych współrzędnych pozycji narzędzia, zarządzanie plikami



Rys. 10. Głowica z zainstalowanym trójosiowym czujnikiem drgań (frezarka SCR-H firmy Sigma)

programów (transfer), wgląd w parametry używanych narzędzi (offset), wykonywanie kopii bezpieczeństwa parametrów maszynowych, dostęp do pól PLC i informacji diagnostycznych.

Grupa Tongtai – producenci zaawansowanych obrabiarek – promuje własne oprogramowanie TIMS (Tongtai Intelligent Manufacturing System) współpracujące z wytwarzanymi maszynami, a także z obrabiarkami innych marek wyposażonymi w sterowniki NC (Siemens, Fanuc, Mitsubishi, Heidenhain). Jest to informatyczny system wspierający działania związane z zarządzaniem produkcją, zwiększaniem efektywności wykorzystania parku maszynowego, podnoszeniem jakości obróbki itp. W jego skład wchodzi pięć podsystemów: zarządzanie produkcją, inteligentne monitorowanie maszyn, zarządzanie narzędziami, zarządzanie produktami, zarządzanie serwisem. W sumie realizowanych jest 26 indywidualnych funkcji. Wszystkie informacje są na bieżąco (online) pozyskiwane z obrabiarek, przetwarzane i prezentowane (rys. 11) w postaci raportów. W razie awarii na panelu operatora prezentowany jest przestrzenny rysunek obrabiarki wraz z odpowiednimi instrukcjami i kartami katalogowymi komponentu, który uległ uszkodzeniu, oraz zalecaną procedurę usunięcia uszkodzenia.



Rys. 11. TIMS – system zarządzania obrabiarkami stworzony przez grupę Tongtai (źródło: www.tongtai.com.tw)

Propozycję zaawansowanego środowiska programistycznego VMX do samodzielnego tworzenia oprogramowania dla sterowników NC inteligentnych obrabiarek i maszyn technologicznych przedstawił także instytut badawczy ITRI. Pozwala ono na przygotowanie własnej maszyny wirtualnej zapewniającej np. współpracę z dodatkowymi czujnikami (drgań, emisji akustycznej), systemami nadzoru i optymalizacji procesu oraz układami monitorowania produkcji. Aplikacja jest instalowana w strukturze sterownika NC i integrowana z oprogramowaniem sterującym. Dla ułatwienia komunikacji możliwe jest wykorzystywanie struktur, takich jak: OPC UA, SQL i IoT [6]. Platforma VMX obsługuje sterowniki NC wiodących wytwórców (takich jak: Siemens, Heidenhain, Fanuc i Mitsubishi).

Możliwe jest także wykorzystywanie urządzeń mobilnych do komunikowania się ze sterownikiem NC.

Niektóre firmy udostępniają klientom chętnym do stworzenia środowiska zdalnego nadzoru nad obrabiarkami specjalny programistyczny interfejs aplikacji (API), pozwalający na bezpośrednie odwoływanie się do zmiennych systemowych sterownika NC maszyny. Przykładem może być producent MillStar korzystający ze sterowników CNC firmy Syntec [7].

Należy jednak mieć na uwadze, że wprowadzanie nowych technologii informatycznych związanych z ideą Przemysłu 4.0 jest niestety obarczone także niekorzystnymi zjawiskami. Szerokie wykorzystanie sieci jako medium komunikacyjnego, przetwarzanie danych w chmurach obliczeniowych, udostępnianie komputerów i sterowników tworzy środowisko podatne na ataki przestępcze, wirusy komputerowe itp. Urządzenia przemysłowe wyposażone w komputerowe systemy sterowania nie są standardowo zabezpieczone przed nieuczciwym dostępem lub oszustwem. W wielu instytucjach badawczych są prowadzone działania mające na celu zażegnanie tych niebezpieczeństw i wprowadzenie zaufanych metod wymiany danych przez systemy automatyki przemysłowej. Koncentrują się one na zagadnieniach programowych, a także proponują wykorzystywanie specjalizowanych modułów sprzętowych, odpowiedzialnych za filtrację komunikatów, szyfrowanie połączeń i inne wymagane bądź użyteczne zabezpieczenia.

Istotną kwestią pozostaje bezpieczeństwo obrabiarek i maszyn. Wydzielane są trzy główne jego obszary, odnoszące się do:

- konstrukcji i kinematyki obrabiarek, maszyn technologicznych oraz systemów inteligentnych,
- sterowników i kontrolerów CNC,
- systemów informatycznych oraz procedur kontrolnych i weryfikacyjnych.

Obecnie wszystkie produkty przemysłu obrabiarkowego spełniają odpowiednie normy oznaczane jako: ISO 23125 (obrabierki), IEC 60204-33 (wyposażenie elektryczne), ISO 11161 (elementy i układy automatyki przemysłowej), ISO/TS 15066 (współpraca robotów i ludzi), IEC 61508 (bezpieczeństwo funkcjonalne) oraz ISO 13849-1 (niezawodność i monitorowanie bezpieczeństwa).

Nowoczesne systemy wytwarzania i ich komponenty (np. bazy danych, chmury obliczeniowe, sterowniki, aplikacje zdalne, smartfony, moduły komunikacyjne, sieci bezprzewodowe) wymagają okresowych aktualizacji (instalacji oprogramowania, wymiany danych z siecią Internet itp.). Może to być to przyczyną zmniejszenia ich bezpieczeństwa. Tradycyjne systemy (CNC, PLC itp.) – wykonywane w architekturze zamkniętej – nie wymagają podejmowania takich działań. Producenci dostrzegają ten problem i dlatego prowadzone są intensywne badania naukowe mające na celu opracowanie standardów i procedur bezpieczeństwa dla inteligentnych systemów wytwarzania.

Czujniki

Podstawą precyzyjnego monitorowania procesu i stanu obrabiarki są oczywiście czujniki pozwalające na dokładne i wierne pomiary interesujących wielkości i zmiennych. Firma Lion jest producentem pojemnościowych czujników przemieszczenia. Mogą być one zastosowane w ultraprecyzyjnych pomiarach. W najbardziej zaawansowanej formie możliwy jest (rys. 12) pomiar w zakresie 10 μm z rozdzielczością 0,06 nm (obszar pomiaru mieści się w okręgu o średnicy 0,5 mm). Typowe zastosowania to pomiary



Rys. 12. Pojemnościowy czujnik przemieszczenia firmy Lion (źródło: <http://www.lionprecision.com>)



Rys. 13. Magnetyczny czujnik przemieszczenia firmy Lion (źródło: www.lionprecision.com)

przemieszczenia, grubości materiału czy wibracji. W ofercie firmy jest także podobny system pomiaru odległości. Wykorzystuje on jednak zjawisko generowania pola magnetycznego podczas indukowania się prądów wirowych w materiale (rys. 13). W zakresie pomiarowym 0,25 mm maksymalna rozdzielczość pomiaru wynosi 0,4 nm przy częstotliwości pomiaru 100 Hz. Dla porównania zaawansowane czujniki dotknięcia (firmy Magnescale) oferują zakres pomiaru przemieszczenia 5 mm i rozdzielczość pomiaru 0,1 μm . Zgodnie z najnowszymi trendami czujniki są wyposażone w moduły sieci przemysłowych (EtherCat lub CC0Link V2) i mogą bezpośrednio współpracować ze sterownikami (PLC, CNC) maszyn.

Omawiane czujniki firma Lion wykorzystwała w kompleksowym systemie monitorowania przemieszczeń wrzeciona SEA (*spindle error analyzer*). Badanie odbywa się w trzech osiach z dokładnością do 1 nm. Bezdotykowa metoda pomiaru pozwala na wykonywanie analiz dynamicznych przy różnych prędkościach obrotowych. Oprogramowanie umożliwia wykrywanie błędów łożyskowania, niewłaściwego napięcia wstępnego, wibracji, odkształceń temperaturowych, częstotliwości rezonansowych itp. [8].

Nie zawsze możliwy jest montaż wszystkich wymaganych lub przewidywanych czujników na etapie budowy obrabiarki. Jednym z przykładów zastosowania układów pomiarowych na obrabiarkach już wykonanych jest produkt firmy Yinsh. Jest to specjalnie zaprojektowany (patent) i wykonany czujnik siły osiowej (rys. 14). Instalowany jest jako podkładka pod precyzyjną nakrętkę w zespole ustalającym wrzeciono. Możliwy jest pomiar statyczny – siła osiowa rozwijana podczas wstępnego naprężania wrzeciona (stabilność dobranych wartości) – oraz pomiar dynamiczny podczas obróbki. Dostępne są różne rozmiary czujnika pozwalające na zastosowanie go do nakrętek



Rys. 14. Yinsh – czujnik siły osiowej (źródło: www.yinsh.com)

o średnicach w zakresie od M40 do M170. Maksymalna mierzona siła osiąga wartość 4000 kG.

W idei Industry 4.0 kluczowym elementem jest sprawna komunikacja pozwalająca na akwizycję różnorodnych danych. Mają temu służyć koncepcje Internetu rzeczy (IoT) i przemysłowego Internetu rzeczy (IIoT) [9]. Na rynku pojawiają się produkty mające ułatwić tworzenie okazjonalnych sieci przemysłowych. Przykładem mogą być wyroby firmy ICP DAS. Produkuje ona koncentratory sprzętowe z wbudowanym silnym mikrokontrolerem (wraz z oprogramowaniem firmowym) oraz rozmaite procesory komunikacyjne. Idea polega na tworzeniu „wysp akwizycyjnych”. Możliwe jest dołączanie różnych czujników i za pomocą sprzęgów komunikacyjnych udostępnianie danych systemom nadrzędnym. Wykorzystywane są do tego metody oparte na protokołach OPC UA oraz MQTT. Jest to metoda komunikacji poprzez pisanie i ekstrakowanie danych (komunikatów) specyficznych dla konkretnej aplikacji, bez konieczności tworzenia prywatnego/dedykowanego połączenia. Zdecydowanie przyspiesza ona integrację różnych urządzeń klasy IIoT.

Podsumowanie

Jak wynika z opisanych przykładów, koncepcja Industry 4.0 jest silnie reprezentowana wśród producentów obrabiarek i urządzeń technologicznych na Tajwanie. Propozycje programowe i sprzętowe jednoznacznie wskazują na akceptację i promowanie tej idei. Jednak należy zwrócić uwagę, że proponowane produkty są raczej przeznaczone dla odbiorców z sektora dużych przedsiębiorstw, dysponujących wysoko zautomatyzowaną produkcją. Jak się wydaje, nie każdy zakład produkcyjny musi wprowadzać koncepcję Industry 4.0. Nie powinno być to działanie obligatoryjne. Istnieje wiele propozycji dla różnych branż, wykorzystujących specjalizowane oprogramowanie ułatwiające wymianę informacji i w konsekwencji zwiększanie efektywności produkcji. Na rynku działa wiele małych i średnich firm oferujących wysoko specjalizowane rozwiązania (sprzętowo-programowe). Wprowadzenie ich również może skutkować znacznym zwiększeniem wykorzystania zasobów zakładu i spadkiem kosztów wytwarzania bez konieczności zmiany całej struktury firmy zgodnie z ideą Przemysłu 4.0. Warto także zwrócić uwagę na możliwość samodzielnego tworzenia oprogramowania. Według badań Instytutu Fraunhofera IPA [10] jest ono wtedy najbardziej odpowiednie i przemysłane oraz może skutkować nawet 75% redukcją kosztów wytwarzania w zakładzie.

LITERATURA

1. [www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI\(2015\)568337_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI(2015)568337_EN.pdf).
2. www.habor.com/pdf/products_en.pdf.
3. en.pmc.org.tw/tg_view.aspx?type=Services&TGD_NO=29.
4. Szulewski P. „Nowoczesne funkcje diagnostyczne we współczesnych sterownikach NC”. *Mechanik*. 1 (2016): s. 5–12.
5. www.syntecclub.com.tw/manual/Mill%20Programming%20Manual-EN.pdf.
6. Szulewski P. „Wykorzystanie technologii OPC do udostępniania danych pomiarowych z procesu i obrabiarki”. *Mechanik*. 8–9 (2015): CD, s. 614–622.
7. <http://www.jiuhyeh.com/e-catalog/index.html>.
8. Śniegulska D., Nejman M., Jemieliński K. „Analiza metod modelowania dynamicznej charakterystyki procesu skrawania”. *Mechanik*. 8–9 (2016): s. 1142–1143.
9. www.honeywellprocess.com/en-US/online_campaigns/IIOT/Pages/IIOT-whitepaper.html.
10. www.ipa.fraunhofer.de/en/cooperation_trumpf.html.