

Digital twin in manufacturing

Part I. State of the art, architecture and applications

Cyfrowy bliźniak w procesach wytwórczych

Część I. Stan zagadnienia, architektura i zastosowania

WIT GRZESIK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2023.1.1>

In this paper, some important achievements in the development of Industry 4.0 (I4.0) strategy based on the concept of advanced digitalization covering smart manufacturing activities using the Internet of Things (IoT) and corresponding digital twin (DT) solutions are highlighted. Some popular definitions and their practical meanings, modeling principles and possible applications are given. Some new trends and enabling technologies in smart (intelligent) manufacturing, i.e. complete digitalization of assets (units, machines, equipment, etc.), processes and systems based on the evolutionary development of DTs are discussed. This paper should encourage industry and academia to undertake this important problem more seriously, to implement its future potential in manufacturing and enhance the I4.0 strategy.

KEYWORDS: manufacturing, Industry 4.0, smart manufacturing, Internet of Things, digital twin

W artykule dokonano przeglądu osiągnięć w zakresie rozwoju strategii Przemysłu 4.0, opartego na zaawansowanej cyfryzacji z wykorzystaniem internetu rzeczy (IoT) i cyfrowego bliźniaka (DT – digital twin). Podano definicje i zasady modelowania oraz przedstawiono możliwe obszary zastosowań cyfrowego bliźniaka. Omówiono trendy w inteligentnym wytwarzaniu, m.in. kompletną cyfryzację maszyn, procesów i systemów wytwórczych, oparte na ewolucyjnym rozwoju koncepcji cyfrowego bliźniaka. Artykuł powinien zachęcić do podjęcia problematyki wprowadzania nowych narzędzi informatycznych w rozwoju strategii Przemysłu 4.0.

SŁOWA KLUCZOWE: przemysł wytwórczy, Przemysł 4.0, inteligentne wytwarzanie, internet rzeczy, cyfrowy bliźniak

Wprowadzenie

W numerze 11/2022 miesięcznika *Mechanik* opisano zasady i środki stosowane w rozwoju procesów wytwórczych z wyróżnieniem wielu filarów tego rozwoju, m.in. cyfryzacji, sztucznej inteligencji i bioniki [1]. Należy podkreślić różnicę w terminologii dotyczącej nowych strategii rozwoju procesów wytwórczych polegającą na tym, że synonimem rozpowszechnionej w Europie, głównie w przemyśle niemieckim, koncepcji Przemysłu 4.0 (I4.0 – *Industry 4.0*) jest w USA tzw. inteligentna produkcja/inteligentne wytwarzanie (*smart manufacturing*) [2]. Inne inicjatywy globalne to *Made in China 2025*, mająca na celu zwiększenie

roli rozwiniętych/wysokich technologii w przemyśle chińskim, oraz podobne przedsięwzięcia wprowadzane w Japonii i Korei Południowej.

W niniejszym opracowaniu zostanie wyartykułowana rola kolejnego filara rozwoju, tj. internetu rzeczy (IoT – *Internet of Things*) lub przemysłowego internetu rzeczy (IIoT – *Industrial Internet of Things*) w rozwoju strategii Przemysłu 4.0, związana z zastosowaniem cyfrowego bliźniaka (DT – *digital twin*). Zostanie również wspomniana koncepcja tzw. cyfrowego cienia (DS – *digital shadow*).

DT został wprowadzony w 2003 r. przez M. Grievesa. Już w 2019 r. był wymieniany jako kluczowa technologia strategiczna [10, 21]. Ten znaczący rozwój jest wynikiem zastosowania innych pokrewnych technologii i przedsięwzięć, takich jak: IoT, duże zbiory danych (*big data*), symulacje wielu zjawisk fizycznych (*multi-physical simulation*), strategia Przemysłu 4.0, sensory działające w czasie rzeczywistym, sieci inteligentnych sensorów, układy cyberfizyczne, zarządzanie danymi i ich przetwarzanie, oraz dążenia do rozwoju w przyszłości cyfrowego wytwarzania. W poznaniu znaczenia tych inicjatyw pomocna jest struktura inteligentnego wytwarzania/inteligentnej produkcji przedstawiona na rys. 1.

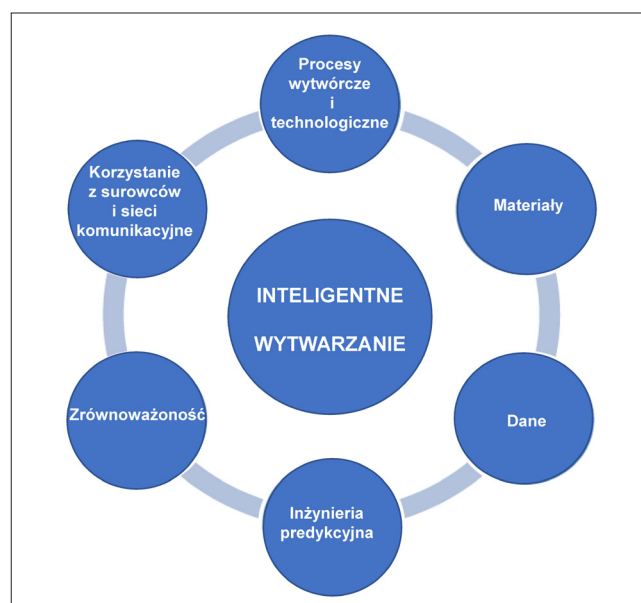


Fig. 1. Six pillars of smart manufacturing [2, 3]

Rys. 1. Sześć filarów inteligentnego wytwarzania [2, 3]

Generalnie koncepcja inteligentnego wytwarzania prowadzi do znaczącego rozwoju technologii automatyzacji, informatyzacji i komunikacji w obrębie fabryki. Chociaż samo określenie może być różnie rozumiane, ponieważ ewoluuje w czasie, to jego definicja podana przez NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) jest następująca [4]: *Inteligentne wytwarzanie jest całkowicie zintegrowanym i zwartym/jednolitym systemem wytwórczym, który reaguje w czasie rzeczywistym na żądane zmiany i warunki w fabryce w odniesieniu do sieci dostaw i potrzeb klienta.*

Inteligentne wytwarzanie jest oparte na sześciu filarach (rys. 1), które nie są jednak trwałe, ponieważ są aktualizowane w wyniku badań rozwojowych prowadzonych na uczelniach i w przemyśle. Należą do nich:

- procesy wytwórcze/technologiczne,
- materiały,
- dane,
- prognozy inżynierskie (inżynieria predykcyjna – *predictive engineering*),
- zrównoważoność (*sustainability*),
- korzystanie z zasobów (surowców) i tworzenie sieci komunikacyjnych.

Kluczowym elementem inteligentnego wytwarzania jest system cybernetyczno-fizyczny (CPS – *cyber-physical system*), który łączy/komunikuje światy/przestrzenie fizyczną i cybernetyczną, aby wspomóc proces wytwórczy. CPS odnosi się do systemów nowej generacji ze zdolnościami obliczeniowymi i fizycznymi, które mogą oddziaływać na siebie oraz z operatorami w czasie rzeczywistym. Do funkcji systemu CPS należą [4]: zbieranie danych w czasie rzeczywistym z przestrzeni fizycznej poprzez zaawansowane połączenia i inteligentne obliczenia, analizowanie oraz zarządzanie danymi w przestrzeni wirtualnej.

Od modelu cyfrowego do cyfrowego bliźniaka

W podejściu ewolucyjnym na podstawie autonomii przepływu danych można wyróżnić trzy kolejne fazy cyfryzacji produkcji. Są to: cyfrowy model (DM – *digital model*), cyfrowy cień (DS – *digital shadow*) i wspomniany cyfrowy bliźniak (DT – *digital twin*) [5, 6, 22]. Różnice w transferze danych w tych trzech kolejnych fazach rozwojowych cyfryzacji, wskazujące na różny poziom ich integracji, przedstawiono na rys. 2.

Z rys. 2a wynika, że w modelu cyfrowym przepływ danych między obiektem/reprezentantem fizycznym i wirtualnym odpowiednikiem jest dokonywany manualnie. Z kolei rys. 2b wskazuje, że dane są przesyłane

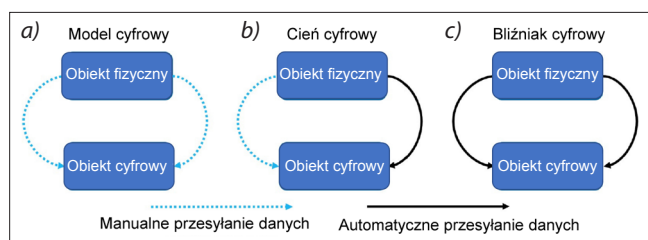


Fig. 2. The data transfer in the case of digital model (a), digital shadow (b) and digital twin (c) [6, 22]

Rys. 2. Transfer danych w przypadku cyfrowego modelu (a), cyfrowego cienia (b) i cyfrowego bliźniaka (c) [6, 22]

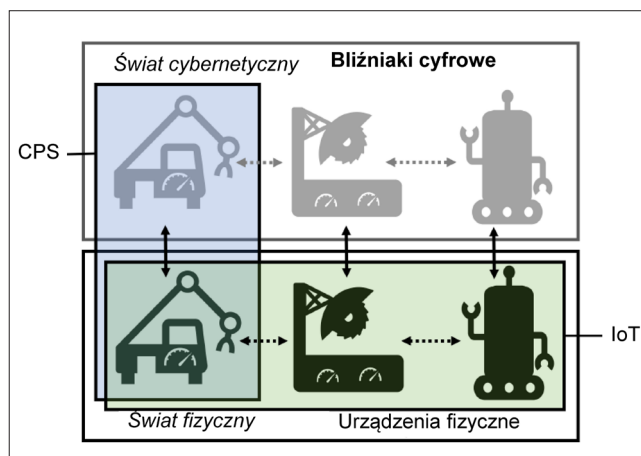


Fig. 3. Relations of CPS, IoT and digital twins in the physical world and the cyber world [7]

Rys. 3. Relacje pomiędzy CPS, IoT i cyfrowymi bliźniakami w świecie fizycznym i cyfrowym [7]

automatycznie z obiektu fizycznego do części cyfrowej, ale ich przepływ w przeciwnym kierunku jest już realizowany manualnie i tym samym nie w czasie rzeczywistym. Natomiast w cyfrowym bliźniaku (rys. 2c) transfer danych w obu kierunkach odbywa się automatycznie, tj. od obiektu fizycznego do odpowiednika cyfrowego i z powrotem.

W zrozumieniu istoty cyfrowego bliźniaka ważne są interakcje pomiędzy internetem rzeczy (IoT), systemem cybernetyczno-fizycznym (CPS – *cyber-physical system*) i cyfrowym bliźniakiem (DT) przedstawione poglądowo na rys. 3.

Należy podkreślić (rys. 3), że cyfrowy bliźniak jest cyfrową reprezentacją obiektu fizycznego, CPS odnosi obydwa światy (obie przestrzenie) – fizyczny i cyfrowy – do cyfrowego bliźniaka i jego odpowiednika fizycznego, natomiast IoT umożliwia łączenie różnych urządzeń (zasobów) pojawiających się w świecie fizycznym [7]. Zgodnie z koncepcją modelu tych relacji, pokazanych na rys. 3, cyfrowy bliźniak jest ograniczony do cyfrowej reprezentacji obiektu fizycznego i jest aktywnym modelem, który uaktualnia się w trybie ciągłym, jeśli jego fizyczny odpowiednik zmienia się w czasie. Wszystkie cyfrowe bliźniaki funkcjonują w świecie cybernetycznym, ale nie mogą istnieć bez swojej kopii fizycznej. W tym sensie CPS można traktować jako swoistego cyfrowego bliźniaka razem z fizycznym stanem obiektu, gdy połączenie świata cybernetycznego i fizycznego następuje poprzez dany obiekt. Natomiast IoT jest traktowane jako połączenie różnych elementów zasobów fizycznych w świecie fizycznym – można łączyć kilka fizycznych elementów w obiekcie poprzez IoT.

Definicja i struktura DT

Początkowo [10, 11] DT definiowano jako wirtualną reprezentację fizycznego produktu zawierającągo informacje o sprzedaży, co miało odniesienie do zarządzania długością życia produktu (PLM – *product life-cycle management*). W artykule z 2008 r. [5] M. Grieves rozszerzył tę definicję i opisał DT złożony z trzech elementów, tj. fizycznego produktu, jego wirtualnej reprezentacji oraz dwukierunkowej wymiany

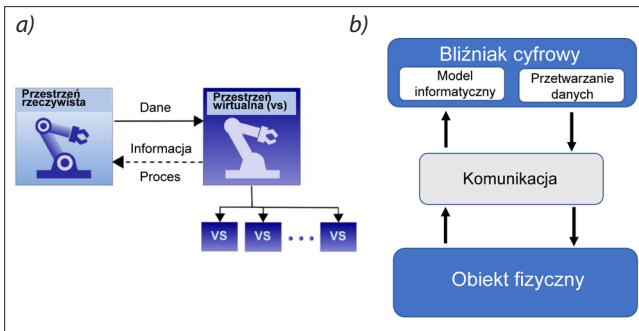


Fig. 4. Mirroring of real and virtual (cyber) spaces (a) and a digital twin (DT) reference model (b) [4, 5, 16, 21]

Rys. 4. Odbicie zwierciadlane przestrzeni rzeczywistej i wirtualnej (a) oraz referencyjny model DT (b) [4, 5, 16, 21]

danych. W ten sposób przekazuje się dane z części fizycznej do reprezentacji wirtualnej oraz przetworzone informacje w odwrotnym kierunku jako przepływ cykliczny, nazwany odbiciem zwierciadlanym albo bliźniakowaniem.

Na rys. 4a pokazano zasadę odbicia zwierciadlaneo (bliźniakowania) przestrzeni fizycznej i wirtualnej, a na rys. 4b znajduje się zbudowany na niej referencyjny model DT. Należy dodać, że przestrzenie wirtualne zawierają dowolną liczbę podprzestrzeni, co umożliwia realizację specyficznych operacji wirtualnych, takich jak modelowanie, testowanie i optymalizacja.

W modelu referencyjnym, przedstawionym na rys. 4b, można wyróżnić trzy elementy, tj.:

- model informatyczny, który wyodrębnia specyfikację obiektu fizycznego,
- mechanizm komunikacji, który transferuje dwukierunkowo dane,
- moduł przetwarzania danych, który może wyciągać informacje z wieloźródłowych, jednolitych danych, aby utworzyć „żywą” reprezentację obiektu fizycznego.

Aby utworzyć DT, wszystkie trzy elementy muszą funkcjonować razem. W dodatku, do wypełnienia przestrzeni między strumieniem jednorodnych danych a modelem informatycznym DT kluczowe jest wysoko efektywne przetwarzanie danych.

W literaturze podaje się wiele różnych, mniej lub bardziej rozszerzonych definicji DT. Po raz pierwszy koncepcja ta została przedstawiona na Uniwersytecie Michigan w 2002 r. w czasie prezentacji dla branży lotniczej na temat inteligentnych systemów wytwórczych [4]. Według [14] DT jest *dokładną wirtualną kopią obiektu, produktu, elementu urządzenia, procesu, łańcucha dostawy i nawet kompletnego biznesowego ekosystemu*. Jest tworzony z użyciem danych pozyskanych przez IoT z sensorów, które są dołączone do oryginalnego obiektu fizycznego lub w niego wbudowane. Możliwe są regulacje DT, aby stwierdzić, jak system się zmieni w czasie rzeczywistym przed ewentualnym wprowadzeniem zmian w oryginalnym systemie fizycznym.

W innym ujęciu DT definiuje się jako *wirtualną reprezentację rzeczywistego produktu w kontekście stosowania CPS*. Ponieważ DT ma duży potencjał, do inteligentnego podejmowania decyzji i uzyskiwania korzystnych ekonomicznie rozwiązań używana jest popularna definicja zaproponowana w 2012 r. przez

NASA: *DT jest zintegrowaną wielofizyczną, wieloskalową, probabilistyczną symulacją złożonego produktu, która stosuje najlepszy dostępny model fizyczny, dane z sensorów w czasie rzeczywistym, dane historyczne itp. w celu odzwierciedlenia życia/funkcjonowania odpowiadającego mu bliźniaka* [8].

Ponieważ przytoczona definicja dotyczyła głównie branży lotniczej, naturalnie zaszła konieczność jej uogólnienia i dopasowania do innych wyrobów i środków produkcji w następującej formie: *DT jest dynamicznym, samorozwijającym się cyfrowym/wirtualnym modelem lub symulacją rzeczywistego podmiotu lub obiektu (części, maszyny, procesu, operatora etc.) reprezentującym/reprezentującą dokładny stan jego fizycznego bliźniaka w każdym punkcie przez wymianę danych w czasie rzeczywistym, jak również z uwzględnieniem danych historycznych/archiwalnych. To nie jest dokładnie DT, który naśladuje swojego fizycznego bliźniaka, ale wszystkie zmiany zachodzące w DT są naśladowane również przez fizycznego bliźniaka* [16].

Trwają prace nad standaryzacją DT przez ISO [18]. W normie ISO 23247, której struktura jest oparta na IoT, system cyfrowego bliźniaka dzieli się na warstwy, przykładowo cztery. Z kolei w normie ISO 30141 wiele funkcjonalnych jednostek jest przypisanych do konkretnych procesów wytwórczych.

Modele strukturalne DT i zasady ich funkcjonowania

Każdy DT w konkretnym otoczeniu/środowisku przemysłowym może zmieniać swój wymiar w zależności od wielu czynników, takich jak [16]: cel działania, wielkość nakładu/budżetu lub wielkości zestawu danych. Z tego względu DT może być pojedynczym

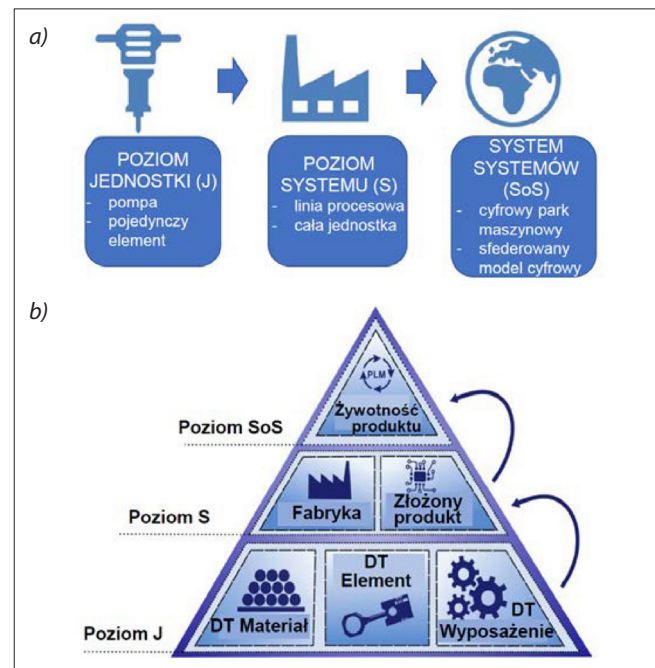


Fig. 5. Three levels of digital twins (a) and their components in manufacturing environment (b) [16]

Rys. 5. Trzy poziomy cyfrowych bliźniaków (a) i ich składowe w środowisku wytwórczym (b) [16]

elementem w maszynie/urządzeniu, ale może się także rozszerzyć na cały proces przemysłowy. W ustawieniu fabrycznym DT może być rozdzielony na trzy poziomy: poziom jednostki, oddzielnego systemu i systemu w złożonych systemach – jak przedstawiono na rys. 5a.

Na pierwszym poziomie hierarchicznym (J) DT może być odniesiony do najmniejszej jednostki uczestniczącej w wytwarzaniu (np. materiału, elementu/części, składnika wyposażenia – rys. 5b). Na drugim poziomie (S) może to być linia produkcyjna, warsztat/wydział lub cała fabryka tworzone z kilku bliźniaków jednostek, a na trzecim (SoS) – odpowiednia liczba systemów, które umożliwiają współpracę różnym przedsiębiorstwom lub różnym działom w przedsiębiorstwie, takim jak: łańcuchy dostaw, projektowanie, obsługa czy utrzymanie ruchu.

Poziom jednostki (J) odnosi się do pojedynczego elementu urządzenia. Jako podstawowy DT określa się pojedynczy model cyfrowy połączony ze swoim bliźniakiem fizycznym. W przypadku bardziej złożonej części urządzenia mogą być tworzone różne modele, np. geometryczne i przestrzenne (3D), modele działania i funkcjonalności, eksploatacji/użycia i degradacji, metrologiczne czy właściwości materiałowych. Mogą to być te same modele lub oddzielne, ale zawsze zwrotnie połączone z jedną jednostką fizyczną.

Poziom systemu (S) jest w zasadzie cybernetyczną wersją większego procesu obejmującego zwielokrotnione, jednostkowe cyfrowe bliźniaki. Takie systemy są zdolne realizować zadane polecenia na bazie informacji zwrotnych, które DT sam pozyskuje z systemu cyfrowych bliźniaków. Konwertują dane z sensorów na wiedzę i mogą realizować swoje zadania autonomicznie.

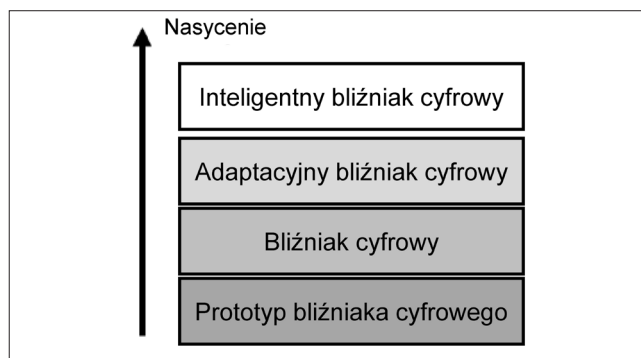


Fig. 6. Division of digital twins into four levels based on maturity levels [16]

Rys. 6. Podział cyfrowych bliźniaków na cztery stopnie zależnie od poziomu nasycenia [16]

Poziom systemu systemów (SoS) sieci zintegrowanych systemów) daje holistyczny obraz wszystkich operacji. W tej skali DT może być jednym z wielu systemów w miejscu lokalizacji produkcji, takim jak: produkcja, logistyka, łańcuch dostaw, serwis hal fabrycznych. W skali globalnej taki DT może być kombinacją podobnych procesów. Umożliwia także porównanie innych lokalizacji i uzyskanie autonomicznych odpowiedzi zwrotnych w celu ich udoskonalenia/usprawnienia.

Innym kryterium podziału jest nasycenie lub poziom złożoności, jak przedstawiono na rys. 6. W tym przypadku można wyróżnić: wstępnego bliźniaka cyfrowego (*pre-digital twin*), właściwego bliźniaka cyfrowego (DT), adaptacyjnego bliźniaka cyfrowego (*adaptive DT*) i inteligentnego bliźniaka cyfrowego (*intelligent DT*). Wstępnego bliźniaka cyfrowego opisuje się jako wirtualny prototyp bez odpowiednika fizycznego, który występuje we właściwym cyfrowym bliźniaku. Adaptacyjny bliźniak cyfrowy ma odpowiednik fizyczny, ale dane są przesyłane w sposób ciągły w czasie

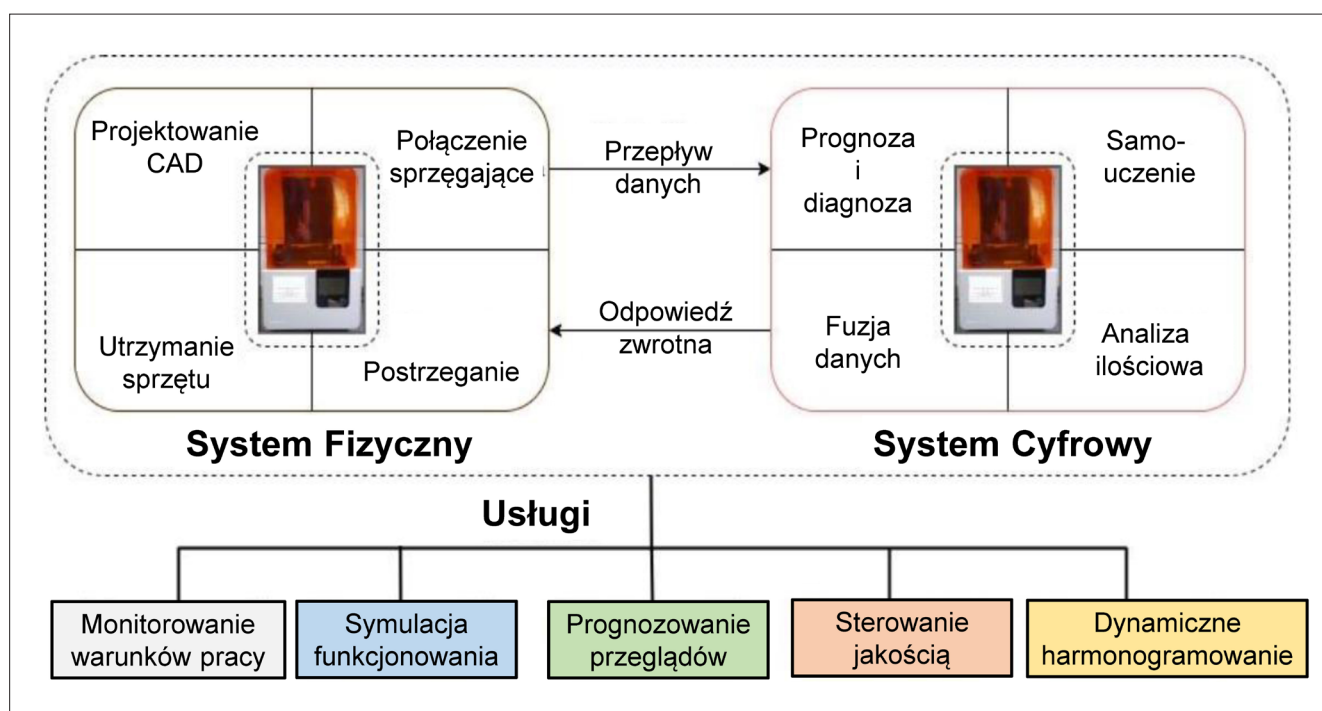


Fig. 7. DT architecture for smart machinery setup in Industry 4.0 [3]

Rys. 7. Architektura DT do układów inteligentnych maszyn w Przemysle 4.0 [3]

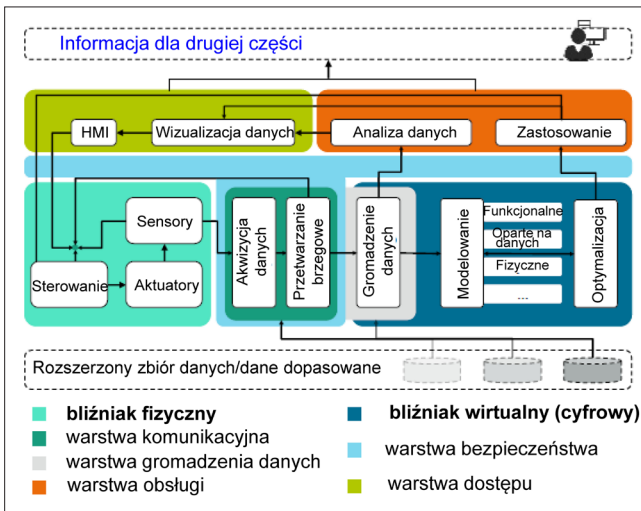


Fig. 8. Digital twin framework consisting of seven layers [8]
Rys. 8. Struktura DT złożona z siedmiu warstw [8]

rzeczywistym. W przypadku inteligentnego bliźniaka cyfrowego dodaje się elementy uczenia maszynowego bez nadzoru, co powoduje wzrost stopnia autonomii.

Na rys. 7 przedstawiono strukturę układu DT przystosowanego do zadań przemysłu wytwórczego [3, 19]. Główne moduły tego układu to: system fizyczny, sieć sensorów, model wirtualny, moduł analityczny oparty na sztucznej inteligencji AI (*artificial intelligence*), narzędzia wizualizacji danych, procedura ciągłego monitorowania maszyn, system wspierania decyzji i pętla sprzężenia zwrotnego do realizacji zautomatyzowanych udoskonaleń. Przez połączenie tych działań uzyskuje się pewność, że cyfrowe wcielenie fizycznej maszyny będzie zawsze dostępne dla zespołu inżynierskiego w fabryce i pomocne w zarządzaniu cyklem życia wytwarzania/produkcji.

W literaturze brak jest jednolitego podejścia do modelowania i symulacji w kontekście zastosowania DT. Nawet jeśli proponuje się wiele narzędzi i metod, to brak jest jednolitej procedury tworzenia modelu, która by umożliwiła zorientowaną na wymagania selekcję narzędzi/metod niezbędną do symulacji DT. Jedną z procedur tworzenia modelu DT z podziałem na cztery warstwy opisano w normie ISO 23247 [18]. Na rys. 8 przedstawiono strukturę DT złożoną z siedmiu warstw o różnych funkcjonalnościach.

Architektura DT przedstawiona na rys. 8 ma następujące warstwy [8]: bliźniak fizyczny utworzony z jednostek sterujących, sensory i aktuatory, warstwę komunikacyjną odpowiedzialną za akwizycję i gromadzenie danych oraz brzegowe przetwarzanie danych i warstwę bezpieczeństwa odpowiedzialną za bezpieczną obsługę przepływu danych. Warstwy czwarta i piąta są przeznaczone do gromadzenia danych, modelowania DT i optymalizacji. Szósta warstwa jest warstwą obsługi odpowiedzialną za rozwój zaawansowanych aplikacji opartych na gromadzonych danych lub standardowe funkcje analizy danych. Siódma warstwa odpowiada za dostarczenie informacji o wartościach dodanych do odpowiedniej giełdy z użyciem wizualizacji danych. Zawiera również urządzenia, które umożliwiają podejmowanie decyzji przez użytkownika i udzielenie odpowiedzi zwrotnej do urządzenia fizycznego, np. przez interfejs maszyna–operator (HMI – *human machine interface*) lub bezpośrednią odpowiedź zwrotną do jednostki sterującej bliźniaka fizycznego.

Zastosowania technologii DT

Praktyczne zastosowania DT można dostrzec w bardzo wielu obszarach gospodarki i funkcjonowania struktury społecznej, takich jak [15, 22]: inteligentne miasto (*smart city*), konstruowanie, inteligentne wytwarzanie, urządzenia medyczne (opieka zdrowotna), rolnictwo, budowa okrętów, robotyka, lotnictwo (np. bezzałogowe statki powietrzne), przemysł motoryzacyjny (np. autonomiczne samochody), kosmonautyka (początki upatruje się w programie Apollo 13 z 1970 r. [24]), energetyka oraz ochrona środowiska. Badania DT są prowadzone już w ponad 80 krajach, w tym w Polsce [23, 26], i tysiącach instytucji naukowo-badawczych na skalę globalną. Według dostępnych statystyk, np. firmy konsultingowej Deloitte [14], udział technologii DT w globalnym rynku do 2023 r. szacowany jest na około 38% stopy wzrostu rocznego i kwotę 16 bln USD. Według ASME [14] do 2025 r. 89% platform IoT będzie zawierać elementy DT, a do 2027 r. będzie to już standardem. Do 2028 r. prawie połowa różnych branż przemysłowych planuje jej stosowanie [24]. Pionierami we wdrażaniu technologii

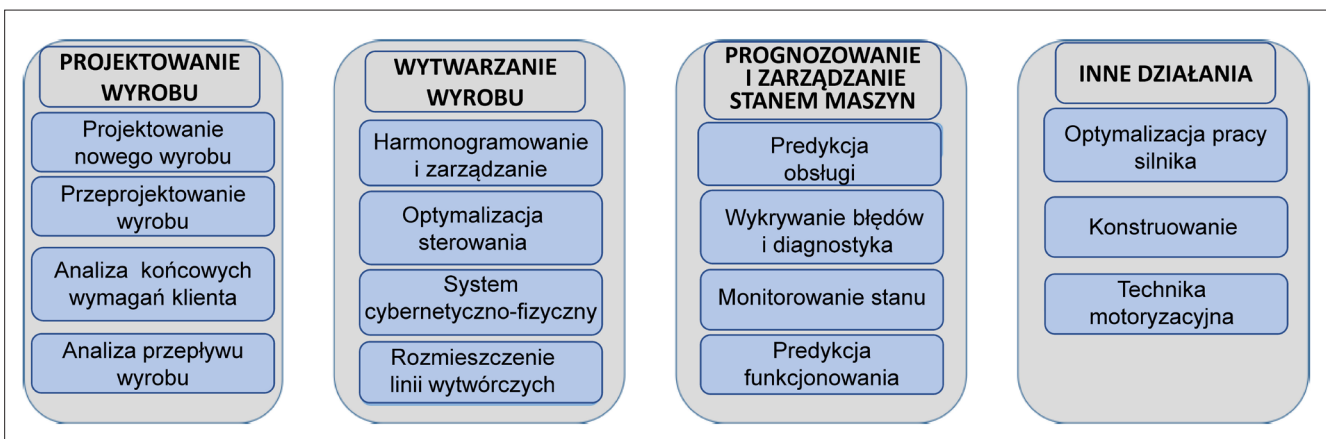


Fig. 9. Applications of digital twins in manufacturing industry [13]
Rys. 9. Zastosowania cyfrowych bliźniaków w przemyśle wytwórczym [13]

DT są znane w świecie firmy, takie jak: GE, PTC, Siemens, ANSYS, Dassault i Tesla [5, 8, 24, 25].

Niektóre ważne obszary zastosowań cyfrowych bliźniaków w przemyśle wytwórczym przedstawiono na rys. 9. Należą do nich: projektowanie produktu, wytwarzanie oraz prognozowanie i zarządzanie stanem maszyn wytwórczych (PHM – *prognostics and health management*). Warto jeszcze raz podkreślić, że cyfrowe bliźniaki mogą być tworzone w wytwarzaniu na różnych poziomach, tj.:

- części składowej jako pojedynczego elementu w procesie wytwórczym,
- zespołu (*asset*) jako części urządzenia zawierającego wiele komponentów w linii produkcyjnej,
- systemu obejmującego całą linię produkcyjną,
- procesu w rozumieniu każdego lub wszystkich występujących w procesie wytwórczym – projektowania, rozwoju, produkcji, dystrybucji i eksploatacji po sprzedaży.

Zastosowania DT w inteligentnym wytwarzaniu rozwijanym w ramach strategii Przemysłu 4.0 i na bazie systemów cybernetyczno-fizycznych (CPS) zostaną szczegółowo przedstawione w drugiej części artykułu.

LITERATURA

- [1] Grzesik W. „Biologizacja procesów wytwórczych. Stan zagadnienia, zasady i trendy rozwojowe”. *Mechanik*. 11 (2022): 8–13, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2022.11.2>.
- [2] O’Sullivan J. “A case-study in the introduction of a digital-twin in a large-scale manufacturing facility”. *Cork Open Research Archive* (CORK), (2020), <http://hdl.handle.net/10468/11867>.
- [3] Kumar S., Patil S., Bongale A., Kotecha K., Bongale M. “Demystifying artificial intelligence based digital twins in manufacturing – a bibliometric analysis of trends and techniques”. *Library Philosophy and Practice* (e-journal), Library University of Nebraska, <https://www.researchgate.net/publication/346057367>.
- [4] Kusiak A. “Smart manufacturing”. *International Journal of Production Research*. 56/1-2 (2018): 508–517, <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>.
- [5] Kritzing W., Karner M., Traar G., Henjens J., Sihn W. “Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification”. *IFAC-PapersOnLine*. 51/11 (2018): 1016–1022, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.
- [6] Bauernhansl T., Hartleif S., Felix T. “The digital shadow of production – a concept for the effective and efficient information supply in dynamic industrial environments”. *Procedia CIRP*. 72 (2018): 69–74, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.188>.
- [7] Lu Y., Liu C., Wang K.I., Huang H., Xu X., “Digital twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues”. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 61 (2019), doi: 10.1016/j.rcim.2019.101837.
- [8] Singh S., Weeber M., Birke K.-P. “Advancing digital twin implementation: a toolbox for modelling and simulation”. *Procedia CIRP*. 99 (2021): 567–572, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.078>.
- [9] Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A. “Enabling technologies and tools for digital twin”. *Journal of Manufacturing Systems*. 58 B (2021): 3–21, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>.
- [10] Tomczyk T., van der Valk H. “Digital Twin Paradigm Shift: The Journey of the Digital Twin Definition”. 2022, <https://www.researchgate.net/publication/360195802>.
- [11] Jones D., Snider Ch., Nassehi Y., Yon J., Hicks B. “Characterising the Digital Twin: A systematic literature review”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 29A (2020): 36–52, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
- [12] Grieves M. “Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication”. A Whitepaper by Dr. Michael Grieves (2014), www.aprison.com.
- [13] Yang D., Karimi H., Kaynak O., Yin S. “Developments of digital twin technologies in industrial, smart city and healthcare sectors: a survey”. *Complex Engineering Systems*. 1:3 (2021), <https://doi.org/10.20517/ces.2021.06>.
- [14] Crawford M. “7 Digital twin for applications in manufacturing”. (21 March 2021), www.asme.org/topics-resources/content/7-digital-twin-applications-for-manufacturing.
- [15] Tao F., Qi Q., Liu A. “Inaugural Editorial – Digital Twin”. *Digital Twin*, 2021(1/1), <https://digitaltwin1.org/articles/1-1>.
- [16] Singh M., Fuenmayer E., Hinchey E., Qiao Y., Murray N., Devine D. “Digital twin: origin to future – review”. *Applied System Innovation*. 4 (2021): 36, <https://doi.org/10.3390/asi4020036>.
- [17] Raza M., Kumar P., Hung D., Davis W., Nguyen H., Trestitian R. “A Digital Twin Framework for Industry 4.0 Enabling Next-Gen Manufacturing”. Conference paper (2020), <https://doi.org/10.1109/ICITM48982.2020.9080395>.
- [18] ISO 23247 – Automation systems and integration – Digital Twin Framework for Manufacturing, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:23247>.
- [19] Wang J., Ye L., Gao R.X., Li C., Zhang L. “Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing”. *International Journal of Production Research*. 57/12 (2019): 3920–3934, <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1552032>.
- [20] Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019. Kasey, Panetta, (October 15, 2018), <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/>.
- [21] Jones D., Snider Ch., Nassehi A., Yon J., Hicks B. “Characterising the Digital Twin: A systematic literature review”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 29 (2020): 36–52, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
- [22] Fuller A., Fan Z., Day Ch., Barlow Ch. “Digital Twin: enabling technologies, challenges and open research”. *IEEE Access* (2020), <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.
- [23] POB5.T4 *Symulacje i modelowanie procesów*, <https://www.polsl.pl/pob5/pob5-t4-symulacje-i-modelowanie-procesow>.
- [24] Dilmegani C. “15 Digital Twin Applications/ Use Cases by Industry in 2022”, (April 25, 2022), <https://www.jamasoftware.com/blog/15-digital-twin-applications-and-use-cases-by-industry-in-2022>.
- [25] Digital production planning and virtual commissioning, <https://new.siemens.com/global/en/markets/automotive-manufacturing/digital-twin-production.html>.
- [26] Yanagimoto J., Banabic D., Banu M., Madej L. “Simulation of metal forming – Visualization of invisible phenomena in the digital era”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 71 (2022): 599–622, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.05.007>. ■