

Łukasz GLODEK, Szymon BYSKO
ProPoint S.A., Politechnika Śląska
Witold NOCOŃ
Politechnika Śląska

NOWE TECHNOLOGIE SYMULACJI ODPOWIEDZIĄ NA POTRZEBY PRZEMYSŁU 4.0

Streszczenie. Z punktu widzenia Przemysłu 4.0 kluczowymi technologiami symulacyjnymi są: cyfrowy bliźniak, cyfrowy cień oraz wirtualne uruchomienie. W niniejszej pracy dokonano porównania nowych technik symulacyjnych oraz możliwości ich zastosowania w przemyśle. Dodatkowo została przeprowadzona analiza rynku i trendu gospodarki światowej pod kątem wdrożenia cyfrowego bliźniaka w różnych gałęziach przemysłu.

NEW SIMULATION TECHNOLOGIES AS AN ANSWER TO THE NEEDS OF INDUSTRY 4.0

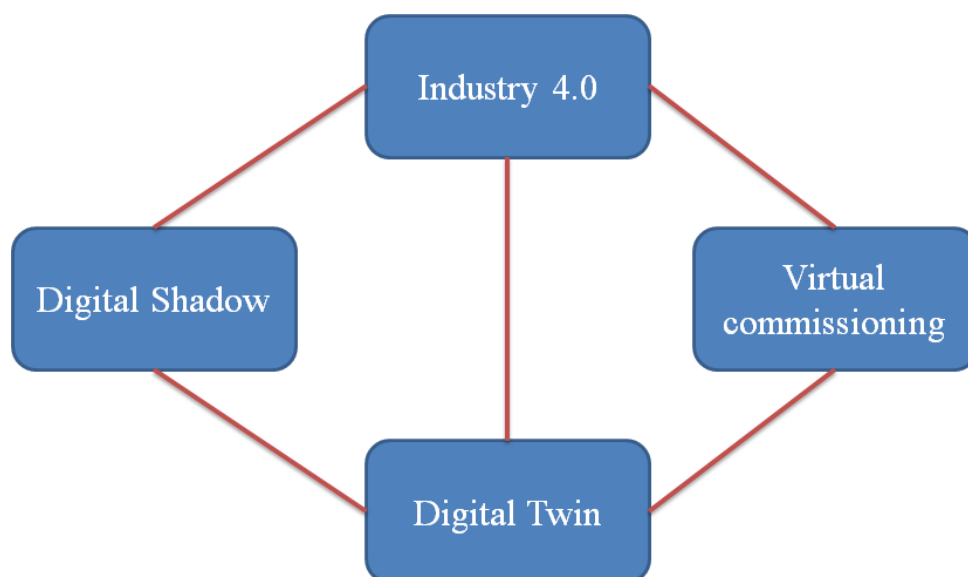
Summary. From the Industry 4.0 point of view, key simulation technologies are as follows: digital twin, digital shadow, and virtual commissioning. This work compared new simulation technologies and their opportunities to implement in the industry. Moreover, the digital twin market analysis and trends in the world market in different industry branches were analyzed.

1. Wprowadzenie

Nowe techniki symulacji, takie jak cyfrowy bliźniak (ang. digital twin), cyfrowy cień (ang. digital shadow) oraz wirtualne uruchomienie (ang. virtual commissioning) są niezwykle istotne z punktu widzenia transformacji cyfrowej przedsiębiorstwa oraz Przemysłu 4.0 (ang. Industry 4.0). Termin Industry 4.0 ma swoją genezę w strategicznej inicjatywie rządu niemieckiego, opiera się na połączeniu środowiska fizycznego z cyfrowym ekosystemem [1]. Wizja Przemysłu 4.0 jest następująca [2]: *jest to część inteligentnego świata sieci, a jego filozofia obejmuje nowatorski biznes, nową infrastrukturę społeczną i interakcje w czasie rzeczywistym*. Ta wizja ma być oparta na „produktach”, „inteligencji”, „sieci IT” i „komunikacji” [2]. Technologia modelowania i symulacji jest jednym z najpopularniejszych komponentów Przemysłu 4.0 i zrewolucjonizowała procesy operacyjne poprzez rozszerzoną rzeczywistość [2]. Jak wiadomo, modelowanie jest wykorzystywane do wielokryterialnej analizy przed uruchomieniem nowego produktu/procesu/operacji, a symulacja jest ważnym narzędziem doskonalenia procesów operacyjnych [2]. W celu wdrożenia Industry 4.0 należy rozpatrzyć następujące czynniki: integracja pozioma poprzez sieć o wartości dodanej, integracja pionowa sieciowych systemów produkcyjnych oraz kompleksowa integracja cyfrowa w całym

łańcuchu wartości [3]. Z idei Industry 4.0 wyłonił się pomysł Smart Manufacturing, który opiera się na monitorowaniu i sterowaniu procesami fizycznymi przez systemy cyfrowe, co w efekcie końcowym wpływa na zwiększenie wydajności procesu produkcyjnego [3]. Poskutkowało to znacznym wzrostem zainteresowania cyfrowym bliźniakiem, jednak w wyniku dużego zainteresowania i stosowania w różnych dziedzinach, termin cyfrowy bliźniak był wielokrotnie używany w różnych kontekstach, definiowano go na różne sposoby, czasem całkowicie sprzeczne [3, 4]. Oprócz cyfrowego bliźniaka, ważnymi elementami są również cyfrowy cień i wirtualne uruchomienie. W literaturze często nie ma jasno zdefiniowanych różnic pomiędzy tymi trzema ideami. Cyfrowy cień charakteryzuje się automatycznym, jednokierunkowym przepływem danych z obiektu rzeczywistego do jego cyfrowego odpowiednika, natomiast cyfrowy bliźniak – dwukierunkowym przepływem danych [5]. Natura i częstotliwość przepływu danych i wymiany informacji pomiędzy dwoma wspomnianymi podmiotami stanowi ich fundamentalne kryterium klasyfikacji [6]. Z kolei wirtualne uruchomienie opiera się na tworzeniu oprogramowania testowego na podstawie wcześniej stworzonych modeli [5]. W niniejszej pracy, poza porównaniem nowych technik symulacyjnych i sposobów ich zastosowanie w przemyśle, dokonano również analizy rynku i trendu gospodarki światowej pod kątem wdrożenia cyfrowego bliźniaka w różnych gałęziach przemysłu, co ukazuje potencjał drzemący w cyfrowym bliźniaku. Dlatego niezwykle ważne jest porównanie nowych technik symulacji, podkreślenia różnic między nimi oraz wskazania obszarów, gdzie można je zastosować. Ponadto na tej podstawie można określić jak duże może być zwiększenie efektywności procesu produkcyjnego i jakie płyną korzyści biznesowe z ich wdrożenia dla potencjalnego inwestora, który wahałby się czy wdrożenie nowych technik symulacji będzie korzystne dla jego przedsiębiorstwa. Interesującym dla przemysłu aspektem jest powiązanie cyfrowego bliźniaka, cyfrowego cienia oraz wirtualnego uruchomienia, gdyż tworzy to spójną całość pozwalającą na implementację nowoczesnych rozwiązań w procesie produkcyjnym. Dlatego też, przeszukano bazę Web of Science pod kątem artykułów naukowych zawierających następujące słowa kluczowe: „digital twin”, „digital shadow” oraz „virtual commissioning”, w wyniku zapytania otrzymano 1631 publikacji. Na tej podstawie wykreślono graf połączeń sieciowych za pomocą aplikacji VOSviewer [7], co przedstawiono na rysunku 1.

Analizując powyższy graf można zauważyć, iż „virtual commissioning” nigdy nie został opisany w jednej pracy równocześnie z „digital shadow”. Najwięcej prac dotyczyło „digital twin”, który obecnie rozwija się najbardziej dynamicznie w porównaniu do pozostałych. Przyczyną zaobserwowanego zjawiska może być fakt, iż wirtualne uruchomienie było pierwszym terminem używanym na cele Industry 4.0, a cyfrowy cień był stopniowo wypierany przez cyfrowego bliźniaka. W niniejszej pracy podjęto próbę wyjaśnienia i uporządkowania różnic i informacji jakie do tej pory zostały zgromadzone i opublikowane w odniesieniu do cyfrowego bliźniaka, cyfrowego cienia oraz wirtualnego uruchomienia. W niniejszej pracy skupiono się na cyfrowym bliźniaku z tego względu, iż technologia ta zawiera elementy cyfrowego cienia oraz wirtualnego uruchomienia – w uproszczeniu można powiedzieć, iż stanowi ona połączenie wspomnianych dwóch technologii. Obecne trendy pokazują, że technologia cyfrowego bliźniaka wypiera dwie pozostałe technologie (cyfrowego cienia i wirtualnego uruchomienia), dlatego też duża część pracy jest poświęcona cyfrowemu bliźniakowi.



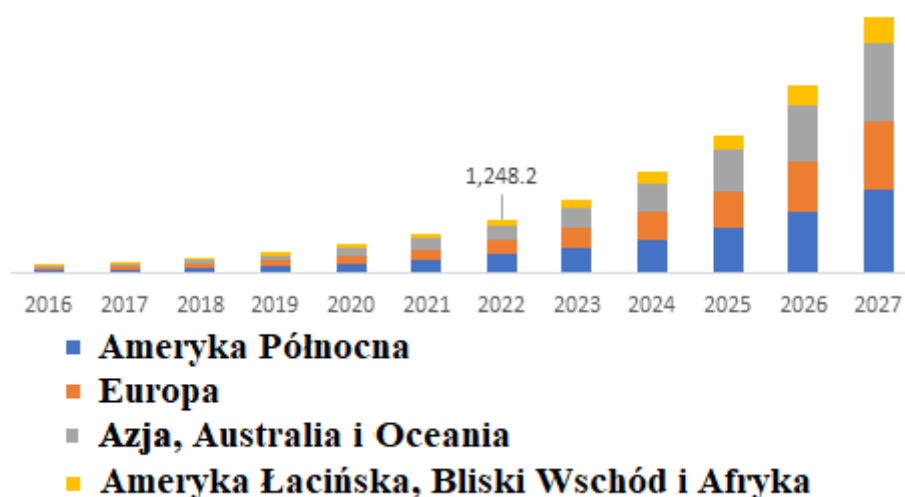
Rys. 1. Graf połączeń sieciowych pomiędzy słowami kluczowymi digital twin, digital shadow, virtual commissioning, industry 4.0 na przestrzeni lat 2017 – 2020.

2. Cyfrowy Bliźniak

Analizując najnowsze trendy rynkowe oraz raporty i prognozy marketingowe, można zauważyć, że cyfrowy bliźniak staje się coraz bardziej znaczącym elementem gospodarki i przemysłu. Wynika to z faktu, iż cyfrowy bliźniak może pełnić rolę swobodnego pomostu pomiędzy wirtualnym a rzeczywistym, fizycznym środowiskiem, na którego zapotrzebowanie staje się coraz większe w różnych gałęziach przemysłu. Według raportu stworzonego przez Global Market Insights Inc., rynek cyfrowego bliźniaka do roku 2027 przekroczy 50 bilionów USD – rysunek 2. Zainteresowanie tą technologią staje się coraz bardziej popularne, ponieważ umożliwia przewidywanie wyników biznesowych firmy, a także monitorowanie wydajności poszczególnych komponentów przemysłowych w różnych obiektach [6].

Przemysłowa koncepcja wirtualnego bliźniaka

Pierwsza terminologia cyfrowego bliźniaka powstała w 2003 roku podczas prezentacji Michaela Grievesa [9]. Dotyczyła ona zarządzania cyklem życiowym produktu [5]. Natomiast pierwsza definicja cyfrowego bliźniaka została podana przez NASA w 2010 roku, brzmi ona następująco: „Cyfrowy bliźniak to zintegrowana, wielofizyczna, wieloskalowa symulacja pojazdu lub systemu, który używa najlepszych z dostępnych fizycznych modeli, aktualizacji czujników, historii floty, etc. w celu odzwierciedlenia działania odpowiadającego mu latającego bliźniaka”. Prekursorem cyfrowego bliźniaka był amerykański program kosmiczny Apollo realizowany w latach 1961-1972, ponieważ był pierwszym przypadkiem w historii stworzenia kopii produktu. Jednakże bliźniak pojazdu naziemnego był kopią sprzętową modułu kosmicznego, a nie cyfrową [6]. W artykule Hendrik van der Walk et al. „A Taxonomy of Digital Twins” [10] stworzono taksonomię terminu „cyfrowy bliźniak”. W pracy tej dokonano szczegółowego przeglądu literatury pod kątem terminu „cyfrowy bliźniak”, poza przytoczoną wyżej definicją, wyodrębniło dwie inne [10]:

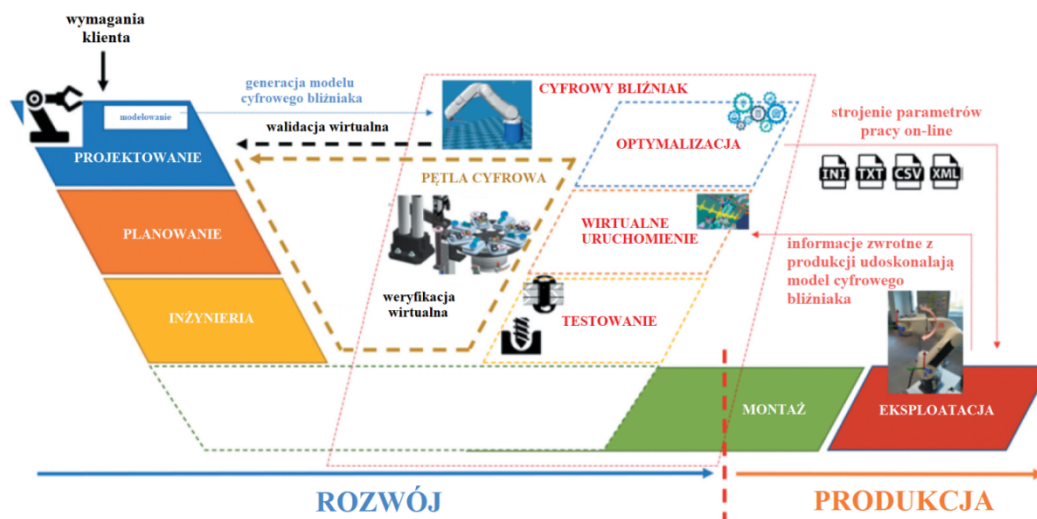


Rys. 2. Rozmiar globalnego rynku cyfrowego bliźniaka w odniesieniu do regionu świata na lata 2016 – 2027, mln USD. Źródło: [8].

1. „Cyfrowy bliźniak to zestaw wirtualnych konstrukcji, które w pełni opisują potencjalny lub faktycznie wytworzony fizycznie produkt od poziomu mikroatomowego do makro poziomu geometrycznego. (...) To opisuje (...) stany operacyjne przechwycone z rzeczywistych danych, bieżących, przeszłych rzeczywistych i przewidywanych przyszłych (...) do różnych celów.” „Koncepcja cyfrowego bliźniaka (...) składa się z trzech głównych części:
 - a) fizycznych produktów w rzeczywistej przestrzeni,
 - b) wirtualnych produktów w wirtualnej przestrzeni,
 - c) dwukierunkowego połączenia danych i informacji, które łączą ze sobą produkty wirtualne i rzeczywiste”.
2. „Cyfrowy bliźniak składa się z trzech części: produktu fizycznego, produktu wirtualnego i połączonych danych, które łączą produkt fizyczny i wirtualny. (...) Następujące cechy cyfrowego bliźniaka zostały podsumowane: refleksja w czasie rzeczywistym (...). Wirtualna przestrzeń (...) może utrzymywać wysoką synchronizację i wierność z przestrzenią fizyczną. (...)”

Przytoczone wyżej definicje obrazują jak różni się definicja cyfrowego bliźniaka w zależności od specyfiki jego zastosowania. Definicje ulegały zmianom i były rozszerzane w kolejnych latach. Na chwilę obecną nie istnieje ujednoczona, uniwersalna definicja pojęcia „cyfrowy bliźniak”, ponieważ w zależności od potrzeb, do jakich wykorzystywany był cyfrowy bliźniak, definicje nieco różniły się od siebie [10]. Warto wspomnieć, iż cyfrowe bliźniaki ewoluowały do eksperymentalnych cyfrowych bliźniaków (ang. Experimental digital twins, EDT) w inżynierii opartej na symulacji [11].

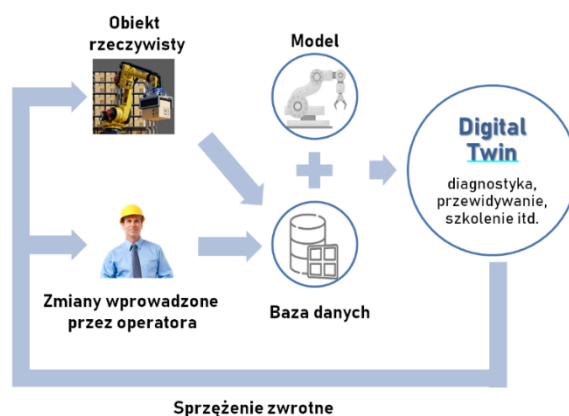
Wyróżniamy wirtualne bliźniaki obiektu i procesu. Wirtualny bliźniak całego procesu umożliwia optymalizację operacji, symulację zmian wprowadzanych do procesu i wykorzystanie tej technologii do szkolenia operatorów produkcyjnych. Według [12], do roku 2020 aż 85% praktycznych zastosowań wirtualnego bliźniaka stanowiły



Rys. 3. Wizja Smart Manufacturing charakteryzująca się ścisłą integracją optymalizacji, uruchomienia i testowania linii produkcyjnej, którą umożliwia cyfrowy bliźniak. Źródło: [6].

urządzenia produkcyjne, a zastosowań cyfrowego bliźniaka na potrzeby całego procesu produkcyjnego było tylko 11%, gdzie pozostałe 4% to inne zastosowania.

Cyfrowy bliźniak jest wirtualną kopią rzeczywistego obiektu lub procesu, opartą na wcześniej zebranych danych. Innymi słowami, jest to cyfrowa reprezentacja systemu fizycznego [13]. Cyfrowy bliźniak przechwytuje dane w czasie rzeczywistym, analizuje bieżący stan, symuluje stan przyszły i optymalizuje wydajność [14], co można zobaczyć na tle całego procesu produkcyjnego na rysunku 3. Przepływ danych jest w pełni zautomatyzowany i dwukierunkowy [13, 6], zmiana stanu obiektu rzeczywistego prowadzi do zmiany stanu obiektu cyfrowego i na odwrót [5].



Rys. 4. Cyfrowy bliźniak w procesie produkcyjnym.

Dane wejściowe mogą służyć do udoskonalenia modelu, na przykład dla modeli adaptacyjnych lub opartych o uczenie maszynowe. W takim przypadku modele i parametry muszą nieustannie ewoluować w sposób automatyczny przez cały okres życia produktu lub systemu, odzwierciedlając w każdym punkcie czasu zachowanie i zmienia-

jące się warunki pracy rzeczywistego, fizycznego bliźniaka [6]. Podsumowując, cyfrowy bliźniak może być uważany za wirtualizację systemu fizycznego. Może opierać się na wiedzy eksperckiej i zebranych rzeczywistych danych, a także umożliwiać właściwą symulację w różnych punktach czasu, w wyniku czego staje się wirtualnym substytutem swojego rzeczywistego odpowiednika [6] (rys 4).

Cyfrowy bliźniak jest używany do oceny złożonych problemów występujących w przemyśle. Najczęściej wirtualne bliźniaki stosuje się do testowania i jako narzędzia do walidacji [13], a także na potrzeby szkolenia operatorów linii produkcyjnej, ponieważ daje im to możliwość obserwacji zachowania systemu w sytuacji awaryjnej. Stosuje się go również do monitorowania procesu w czasie rzeczywistym i przewidywania przyszłych stanów, czyli do prognoz symulacyjnych [14, 6]. Ponadto umożliwia kontrolę systemów przewidujących awarię, zarządzanie obiektami w czasie rzeczywistym [14]. Jest najbardziej odpowiedni do przemysłowych aplikacji, jako ocena jakości produktu, planowanie produkcji oraz do kontroli współpracy człowiek-robot [6].

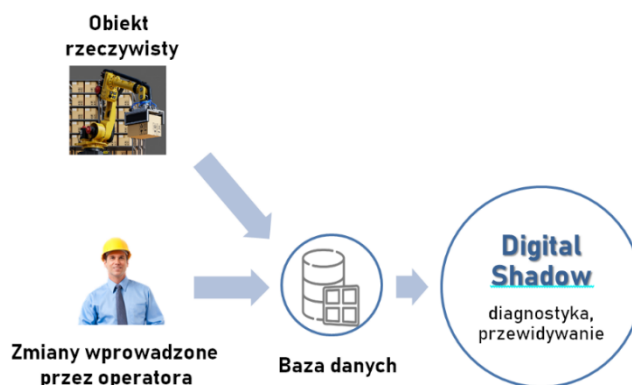
Korzyści płynące z zastosowania wirtualnego bliźniaka w różnych gałęziach przemysłu:

- zmniejszenie liczby eksperymentów koniecznych do przeprowadzenia [14]
- wszelkie niepewności, niedokładności i rozbieżności napotymane w świecie fizycznym, które powodują niezgodność pomiędzy przestrzenią fizyczną a wirtualną mogą zostać wyeliminowane dzięki wdrożeniu odpowiednich rozwiązań (np. uczenie maszynowe, głębokie uczenie)
- zwiększenie wydajności procesu poprzez mniejsze zużycie materiału (np. w przemyśle farmaceutycznym – mniejsze zużycie odczynników biologicznych lub chemicznych), co pośrednio wspiera również aspekt ekologiczny.

3. Cyfrowy Cień

Jest to cyfrowy obraz obiektu rzeczywistego [15]. Cyfrowy cień zbiera dane w czasie rzeczywistym. Dane zawierają aktualne oraz historyczne statusy obiektu [15]. W odróżnieniu od wirtualnego bliźniaka, przepływ danych jest procesem jednokierunkowym (obiekt -> cyfrowy cień) [13]. Dlatego nie ma sprzężenia zwrotnego do systemu rzeczywistego z jego wirtualnego odpowiednika [6], co można zauważyć na rysunku 5. Zmiana stanu obiektu rzeczywistego prowadzi do zmiany stanu obiektu cyfrowego [5].

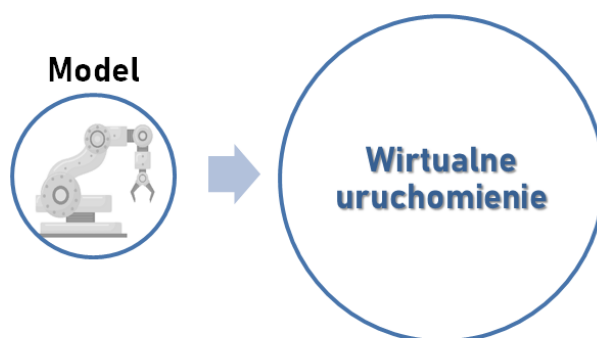
Głównym celem implementacji cyfrowego cienia w przedsiębiorstwie jest umożliwienie analizy i symulacji skomplikowanych systemów produkcyjnych wirtualnie [16]. Na całym świecie dokonano już wielu implementacji cyfrowego cienia w przemyśle. Jednym z przykładów może być użycie cyfrowego cienia przez *Hong Kong Industrial Artificial Intelligence & Robotics Centre (FLAIR)* do zdalnego zarządzania produkcją na dużą skalę poprzez zdalny monitoring [16]. Innym przykładem innowacyjnego wdrożenia cyfrowego cienia do przemysłu jest stworzenia cyfrowego cienia produktu – przedniej szyby samochodu, gdzie stanowi on cyfrową reprezentację fizycznego obiektu (przedniej szyby samochodu) i odzwierciedla wszystkie zmiany dokonane na obiekcie fizycznym (np. jej kształt geometryczny, właściwości materiału) [17]. W szczególności cyfrowy cień jest używany w większości w fazie serwisowej i utrzymania, do śledzenia zmian i przewidywania zachowania produktu w jego fazie użytkowej [6].



Rys. 5. Cyfrowy cień w procesie produkcyjnym.

4. Wirtualne Uruchomienie

Jest to stworzenie symulacji do celów testowania sterowników PLC (ang. Programmable Logic Controller – programowalny sterownik logiczny) i robotów, przed uruchomieniem rzeczywistym – rysunek 6. Wirtualne uruchomienie jest stosowane wyłącznie dla obiektów przemysłowych bądź linii produkcyjnych, będących w fazie budowy / uruchomienia lub przebudowy. Wirtualne uruchomienie to rozwój i walidacja na wczesnym etapie kodu sterownika PLC za pomocą modelu symulacyjnego. Kod PLC steruje modelem wirtualnym (model zachowania), który zachowuje się jak rzeczywista maszyna. Dlatego też, program PLC może zostać zoptymalizowany i przetestowany przed rzeczywistym uruchomieniem [18].



Rys. 6. Wirtualne uruchomienie.

5. Porównanie cyfrowego bliźniaka, cyfrowego cienia i wirtualnego uruchomienia

Cyfrowy cień od cyfrowego bliźniaka różni się stopniem integracji pomiędzy zasobem fizycznym i jego wirtualną kopią. Zarówno cyfrowy bliźniak, jak i cyfrowy cień służą do przewidywania różnych sytuacji awaryjnych (mają możliwość porównywania bieżącego stanu obiektu ze stanem wyliczonym za pomocą modelu) i monitorowania.

Natomiast wirtualne uruchomienie służy wyłącznie do testowania oprogramowania PLC i robotów. Kolejną znaczącą różnicą jest moment wdrożenia technologii symulacyjnej. Wirtualne uruchomienie wdraża się w momencie budowy lub przebudowy linii produkcyjnej, natomiast cyfrowy bliźniak oraz cyfrowy cień działają na już uruchomionym obiekcie. W celu porównania trzech idei zawartych w Industry 4.0, zebrano w tabeli 1 cechy, które ukazują podobieństwa i różnice pomiędzy cyfrowym bliźniakiem, cyfrowym cieniem oraz wirtualnym uruchomieniem.

Tabela 1

Porównanie cech cyfrowego bliźniaka, cyfrowego cienia oraz wirtualnego uruchomienia

Cecha	Cyfrowy bliźniak	Cyfrowy cień	Wirtualne uruchomienie
Kopia rzeczywistego obiektu	+	+	+
Dane w czasie rzeczywistym	+	+	-
Kierunek procesu wymiany danych	dwukierunkowy	jednokierunkowy	nie dotyczy
Moment wdrożenia technologii symulacyjnej	po uruchomieniu obiektu	po uruchomieniu obiektu	przed uruchomieniem obiektu / w trakcie przebudowy linii produkcyjnej

6. Podsumowanie

Przegląd literatury oraz definicji, którego dokonano w niniejszej pracy pozwolił na uporządkowanie wiedzy w zakresie idei cyfrowego bliźniaka, cyfrowego cienia oraz wirtualnego uruchomienia. Jest to niezwykle ważne z przemysłowego punktu widzenia, ponieważ dotychczas prace naukowe nie traktowały o powyższych trzech ideach jednocześnie (czego dowiedziono we wstępie), a skupianie się w pracy na tylko jednej lub dwóch ideach stworzyło podwaliny do własnej interpretacji danego pojęcia na potrzeby danego przemysłu lub konkretnej linii produkcyjnej. Przykładem tego może być przytoczony przykład cyfrowego cienia przedniej szyby samochodu [17] jako cyfrowej reprezentacji fizycznego obiektu, odzwierciedlającej wszelkie zmiany dokonywanych na obiekcie fizycznym. Kolejnym przykładem jest cyfrowy bliźniak w przemyśle farmaceutycznym [14], czy też wykorzystanie cyfrowego bliźniaka do oceny poprawności założeń projektowych zastosowanych do implementacji autonomicznych robotów mobilnych na linii produkcyjnej [19]. Wynikiem tego były całkowicie różne, czasem nawet sprzeczne definicje. Analiza bieżących trendów rynkowych oraz kierunku rozwoju gospodarki pozwoliła na wysunięcie wniosków, iż cyfrowy bliźniak staje się coraz bardziej pożądanym elementem do wdrożenia w wielu gałęziach przemysłu i cechuje go tendencja wzrostowa, jeśli chodzi o atrakcyjność dla potencjalnych inwestorów. Wdrożenie cyfrowego bliźniaka, cyfrowego cienia oraz wirtualnego uruchomienia jednocześnie niesie z sobą szereg korzyści biznesowych.

Praca finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Doktorat Wdrożeniowy” nr 0053/DW/2018/02. Witold Nocoń finansowany z grantu SUT - subsidy for maintaining and developing the research potential: W. Nocoń (grant 02/060/BK_21/0022).

LITERATURA

1. Sepasgozar S.M.E.: Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment. *Buildings* 2021, 11, 151. DOI: 10.3390/buildings11040151
2. Ercan Oztemel, Samet Gursev.: A Taxonomy of Industry 4.0 and Related Technologies, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.90122
3. Chen G., Wang P., Feng B., Li Y., Liu D.: The framework design of smart factory in discrete manufacturing industry based on cyber-physical system, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33:1, 2020, p. 79-101, DOI: 10.1080/0951192X.2019.1699254
4. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W.: Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification”. *IFAC-PapersOnLine* 51 (11): 1016-1022, 2018. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474
5. Ladj A., Wang Z., Meski O., Belkadi F., Ritou M., Da Cunha C.: A knowledge-based Digital Shadow for machining industry in a Digital Twin perspective. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 58 part B, 2021, 168-179. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.07.018
6. Lattanzi L., Raffaelli R., Peruzzini M., Pellicciari M.: Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2021. DOI: 10.1080/0951192X.2021.1911003
7. Van Eck N. J., Waltman L.: Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 2010, p. 523-538. DOI: 10.1007/s11192-009-0146-3
8. Wadhvani P., Loomba S.: Digital Twin Market Size By Application (Product Design & Development, Machine & Equipment Health Monitoring, Process Support & Service), By End Use (Manufacturing, Healthcare, Automotive, Aerospace & Defense, Energy & Utility, Infrastructure Buildings, Retail & Consumer Goods), Industry Analysis Report, Regional Outlook, Growth Potential, Competitive Market Share & Forecast, 2021 – 2027, Global Market Insights, 2021, Report ID: GMI2196
9. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C.: Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358
10. Van Der Walk H., Möller F., Henning J.-L., Haße H., Arbter M., Otto B.: A Taxonomy of Digital Twins. 26th Americas Conference on Information Systems (AMCIS), Salt Lake City, USA, 2020

11. Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann J.: Experimentable Digital Twins – Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 4, 2018
12. Lu Y., Liu C., Wang K., Huang H., Xu X.: Digital Twin-Driven Smart Manufacturing Connotation, Reference Model, Applications and Research Issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 61:101837, 2020. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837
13. <https://www.simio.com/blog/2021/07/12/virtual-models-digital-shadows-digital-twin-applications-manufacturing/> [dostęp: 10 czerwca 2022]
14. Bossuyt P., Raemdonck C.: Digital proces Twin – How to implement digital twin solutions for the pharmaceutical industry. Siemens – webinar, 2021
15. KUKA.: Hello Industrie 4.0 – Glossary
16. <https://www.hkflair.org/our-programmes/digital-shadows-for-distributed-manufacturing/> [dostęp: 10 czerwca 2022]
17. <https://www.linkedin.com/pulse/industry-40-creating-digital-product-shadow-dr-tilman-buchner> [dostęp: 10 czerwca 2022]
18. Lechler T., Fischer E., Metzner M., Mayr A., Franke J.: Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 81, 2019, 1125-1130
19. Strączek P., Pizoń J., Danilczuk W., Gola A.: A Digital Twin Approach for the Improvement of an Autonomous Mobile Robots(AMR's) Operating Environment—A Case Study. *Sensors* 2021, 21, 7830.