

Adrian KAMPA, Damian KRENCZYK, Bożena SKOŁUD  
Politechnika Śląska

## **OCENA OPÓŹNIEŃ CZASOWYCH W WYMIANIE DANYCH MIĘDZY CYFROWYM BLIŹNIAKIEM OPARTYM NA SYMULACJI A KOMPONENTAMI AUTOMATYKI PRZEMYSŁOWEJ**

**Streszczenie.** Cyfrowe bliźniaki systemów produkcyjnych są coraz częściej wykorzystywane nie tylko do monitorowania i wirtualnego uruchamiania, ale także jako narzędzia wspomagające podejmowanie decyzji w cyberfizycznych systemach produkcyjnych. W takich zastosowaniach użyteczność zależy nie tylko od podobieństwa strukturalnego, ale także od wierności czasowej, tj. od tego, jak dokładnie model cyfrowy odtwarza synchronizację zdarzeń procesowych. Niniejszy artykuł rozszerza naszą wcześniejszą metodologię cyfrowych bliźniaków o analizę opóźnień w wymianie danych między modelem FlexSim a sygnałami przemysłowymi przesyłanymi przez PLC. Artykuł koncentruje się na wierności czasowej, na przykładzie jednego konkretnego scenariusza walidacji zaimplementowanego w konfiguracji Digital Twin in the Loop z FlexSim, Siemens TIA Portal, PLCSim Advanced v6 i lokalnym łańcuchem komunikacji sieciowej. Wyniki pokazują, że pomimo że bezwzględne znaczniki czasu sygnałów PLC mogą ulegać zauważalnym zmianom, to rytm procesu jest wystarczająco dobrze zachowany, aby umożliwić monitorowanie, analizę i wsparcie decyzyjne.

## **ASSESSING TIME DELAYS IN DATA EXCHANGE BETWEEN A SIMULATION-BASED DIGITAL TWIN AND INDUSTRIAL AUTOMATION COMPONENTS**

**Summary.** Digital twins of manufacturing systems are increasingly being used not only for monitoring and virtual commissioning but also as decision-support tools in cyber-physical production systems. In such applications, usefulness depends not only on structural similarity but also on temporal fidelity, i.e., how accurately the digital model reproduces the synchronization of process events. This paper extends our earlier digital twin methodology by analyzing the latency in data exchange between the FlexSim model and industrial signals transmitted by the PLC. The paper focuses on temporal fidelity, using one specific validation scenario implemented in a Digital Twin in the Loop configuration with FlexSim, Siemens TIA Portal, PLCSim Advanced v6, and a local network communication chain. The results show that although the absolute timestamps of PLC signals may change noticeably, the process rhythm is sufficiently well preserved to enable monitoring, analysis, and decision support.

## 1. Wprowadzenie

Symulacja zdarzeń dyskretnych w ostatnich latach przekształciła się z narzędzia planowania offline w cyfrowego bliźniaka połączonego z danymi operacyjnymi. We wcześniejszych artykułach współautor zaproponował metodę tworzenia cyfrowych bliźniaków produkcyjnych w oparciu o modele FlexSim z dwukierunkową wymianą danych procesowych, a następnie rozszerzyli tę koncepcję na cyberfizyczne systemy produkcyjne, w których bliźniak staje się środowiskiem dla uczenia się przez wzmacnianie i innych modułów analitycznych [5-7]. Niniejszy artykuł podąża tym nurtem badań, ale koncentruje się na innym zagadnieniu: jak wiernie taki bliźniak odtwarza synchronizację zdarzeń po podłączeniu modelu do łańcucha komunikacyjnego za pośrednictwem sterownika PLC?

Problem ten jest istotny, ponieważ wiele zastosowań cyfrowych bliźniaków zależy od synchronizacji danych. Jeśli od bliźniaka oczekuje się monitorowania stanu bieżącego, porównywania zachowań nominalnych i operacyjnych, wspierania decyzji online lub dostarczania obserwacji stanu dla algorytmów uczących się, relacja czasowa między procesem źródłowym a cyfrowym bliźniakiem ma znaczenie. Jednocześnie w produkcji dyskretniej dokładna zgodność znaczników czasu nie zawsze jest najważniejszym kryterium. W przypadku monitorowania cyklu lub analizy taktu zachowanie rytmu i kolejności zdarzeń może być ważniejsze niż dopasowanie każdego znacznika czasu.

Niniejszy artykuł porusza ten problem w kontekście cyfrowego bliźniaka systemu sortowania elementów z demontażu opartego na symulacji dyskretniej w środowisku FlexSim. Istotnym punktem jest to, że architektura cyfrowego bliźniaka opracowana w naszej wcześniejszej pracy została opisana w sposób ogólny: warstwa emulacji może korzystać z kilku interfejsów przemysłowych, w tym OPC UA, OPC DA i Siemens S7. Eksperyment opisany w niniejszym artykule został jednak zaimplementowany w jednej konkretnej konfiguracji DTiL (ang. *Digital Twin in the Loop*) [4] opartej na wirtualnym sterowniku Siemens i protokole komunikacyjnym S7. Z tego powodu artykuł nie jest punktem odniesienia dla OPC UA lub S7 rozpatrywanych w izolacji. Jest to ocena wierności czasowej w jednym reprezentatywnym środowisku replikacji za pośrednictwem PLC. Artykuł ma dwa cele. Po pierwsze, formułuje problem wierności czasowej w sposób spójny z cyfrowymi bliźniakami systemów produkcyjnych opartymi na symulacji dyskretniej. Po drugie, przedstawia badanie eksperymentalne oparte na sygnałach fotokomórek i analizie czasowej między zdarzeniami. Główne osiągnięcia niniejszej pracy stanowią:

1. rozszerzenie metodologii cyfrowego bliźniaka opartej na symulacji dyskretniej w kierunku oceny wierności czasowej;
2. podejście pomiarowe oparte na znacznikach czasu zdarzeń i różnicach między zdarzeniami, które zmniejsza wpływ początkowego niedopasowania zegara;
3. analiza empiryczna reprodukcji opóźnień i taktów w konfiguracji DTiL w sieci lokalnej z wykorzystaniem FlexSim i wirtualnego sterownika PLC firmy Siemens.

## 2. Przegląd literatury - powiązane prace i luki badawcze

Szeroka literatura umieszcza już cyfrowe bliźniaki w centrum cyberfizycznych systemów produkcyjnych i kładzie nacisk na wymianę danych, dwukierunkowe

sprzężenie i wspomaganie decyzji w produkcji [8, 9, 12]. To tło jest również spójne z wcześniejszymi pracami autorów dotyczącymi bliźniaków systemów produkcyjnych opartych na symulacji dyskretnej DES (ang. *Discrete Event Simulation*) [5]. Najnowsze publikacje pokazują również, że konieczna jest ocena nie tylko strukturalnej korespondencji między warstwą fizyczną i cyfrową, ale także zdolności bliźniaka do reprezentowania ewolucji systemu w czasie. Szántó i in. omawiają ekspresję czasoprzestrzenną jako jeden z wymiarów jakości cyfrowego bliźniaka [11], podczas gdy Wooley i in. pokazują, jak symulację zdarzeń dyskretnych można przenieść w kierunku działania cyfrowego bliźniaka online w produkcji [15]. Synchronizacja stała się odrębnym zagadnieniem badawczym. Badania zorientowane na zastosowania ilościowe określają efekty synchronizacji w montażu robotów i obrabiarkach CNC [10, 13]. W artykułach [2, 3] omówiono kompromis między terminowością a dokładnością w bliźniakach zorientowanych na IIoT oraz wydajność komunikacji wirtualnych sterowników PLC w przemysłowych środowiskach brzegowych. Przytoczone prace potwierdzają, że rozbieżność czasowa jest mierzalna i istotna, jednak dotyczą one głównie scenariuszy procesów ciągłych, a nie symulacji dyskretnych procesów produkcyjnych sterowanych zdarzeniami.

Inny nurt prac koncentruje się na komunikacji przemysłowej. Freitas i in. porównują wydajność komunikacji OPC-UA w scenariuszach cyfrowych bliźniaków [1]. Taka praca jest cenna przy wyborze protokołu, jednak nie odpowiada w pełni na postawione tutaj pytanie: jaki jest wpływ próbkowania i wymiany danych za pośrednictwem PLC na wierność czasową samego bliźniaka opartego na symulacji? Voronin i in. są najbliżej tego zagadnienia, badając opóźnienie sygnału w cyfrowych bliźniakach systemów elektromechanicznych i hydraulicznych [14], ale nie zajmują się kwestią, czy synchronizacja zdarzeń związana z taktem pozostaje wierna w bliźniaku produkcyjnym opartym na DES.

Lukę omówioną w niniejszym artykule można opisać następująco. Badania ilościowe dotyczące cyfrowych bliźniaków opartych na symulacji dyskretnych systemów produkcyjnych, w których bliźniak jest implementowany w oprogramowaniu DES i aktualizowany za pośrednictwem komunikacji za pośrednictwem PLC, są nadal niewystarczające. W szczególności literatura nadal nie wyjaśnia w wystarczającym stopniu: (i) rozróżnienia między dokładnością bezwzględną znacznika czasu a wiernością synchronizacji między zdarzeniami, (ii) łącznego wpływu interwału próbkowania, cyklu PLC i łańcucha komunikacyjnego na wierność obserwowalnych bliźniaków oraz (iii) czy uzyskana wierność jest wystarczająca do monitorowania i analizy opartej na taktach.

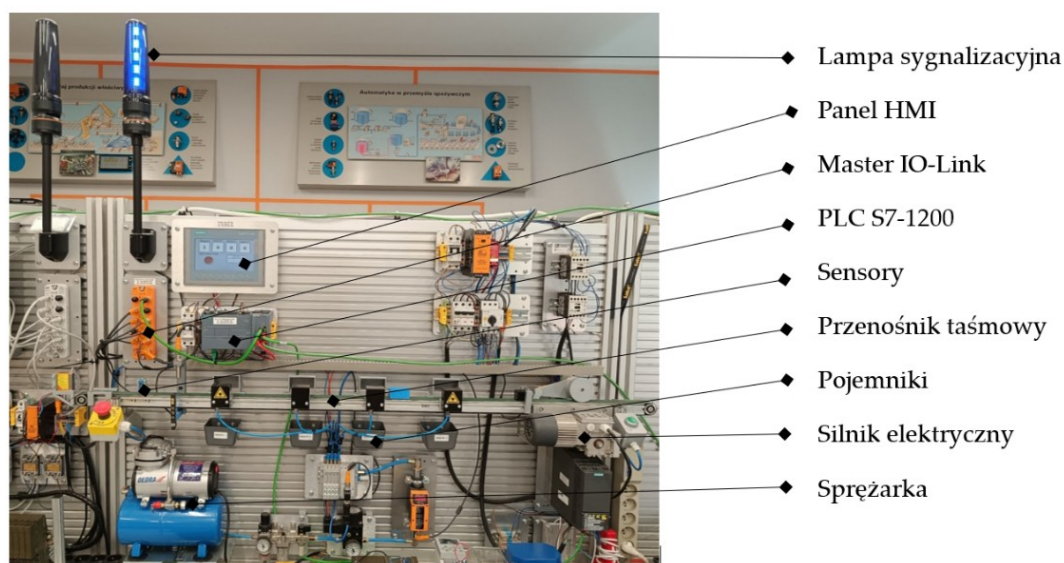
### **3. Ramy cyfrowego bliźniaka oparte na symulacji dyskretnej**

Punktem wyjścia jest model cyfrowego bliźniaka opracowany we wcześniejszych pracach [4–7]. W tym nurcie badań model symulacji zdarzeń dyskretnych nie jest traktowany jako pomocnicza warstwa wizualizacji, lecz jako główna reprezentacja operacyjna systemu produkcyjnego w ramach architektury cyberfizycznej. Podstawowym krokiem metodologicznym było przejście od modelu cyfrowego, aktualizowanego jedynie na podstawie danych offline lub importowanych okresowo, do cyfrowego bliźniaka zdolnego do odzwierciedlania bieżących zmian w procesie poprzez

dwukierunkową wymianę danych. W praktyce oznacza to, że model musi odtwarzać nie tylko strukturę i logikę, ale także aktualny stan zaawansowania produkcji, stany wybranych zasobów oraz strumień zdarzeń generowany przez warstwę sterowania. Model łączy zatem dwa uzupełniające się sposoby dostępu do danych. Pierwszy jest pośredni i odpowiada perspektywie przetwarzania danych opracowanej we wcześniejszych pracach, gdzie dane produkcyjne i planistyczne mogą być pozyskiwane z warstw przedsiębiorstwa i nadzoru, takich jak ERP, MES i SCADA, przekształcane w neutralną reprezentację, a następnie mapowane w środowisku symulacyjnym [5, 7].

Druga ścieżka jest bezpośrednia i wykorzystuje interfejsy emulacyjne oprogramowania symulacyjnego. W poprzednich pracach autorów, FlexSim był sprzężony z komponentami automatyki, czujnikami i usługami komunikacyjnymi związanymi z PLC, co umożliwiało wymianę wybranych zdarzeń i stanów online [4-5]. Ta bezpośrednia ścieżka to mechanizm umożliwiający przejście modelu od analizy offline do replikacji na żywo, wirtualnego uruchomienia, a następnie do współpracy z modułami analitycznymi.

W badaniach uczenia się przez wzmacnianie, ta sama podstawa metodologiczna została rozszerzona: gdy cyfrowy bliźniak mógł odtworzyć dynamikę procesu i komunikować się z otaczającą warstwą sterowania, mógł również stać się środowiskiem dla algorytmów decyzyjnych implementowanych poza modelem symulacyjnym [6-7]. Bliźniak służy wówczas nie tylko do odzwierciedlania systemu, ale także do dostarczania obserwacji stanu, akceptowania działań i oceny ich konsekwencji. To tło jest ważne dla niniejszej pracy, ponieważ wyjaśnia, dlaczego wierność temporalna jest naturalnym kolejnym krokiem w trajektorii badań. Jeśli bliźniak oparty na symulacji ma wspierać monitorowanie, porównywanie zachowań nominalnych i operacyjnych lub modułów uczenia się i podejmowania decyzji, to jakość wymienianych informacji czasowych staje się częścią samej jakości modelu. Bliźniak, który jest strukturalnie poprawny, ale zniekształcony czasowo, może nadal być przydatny w niektórych zadaniach, ale mylący w innych. Dlatego w artykule analizowana jest wierność czasowa w tej konkretnej konfiguracji linii sortowania opartej na sterowniku PLC (rys. 1), bez porównywania innych protokołów komunikacyjnych.



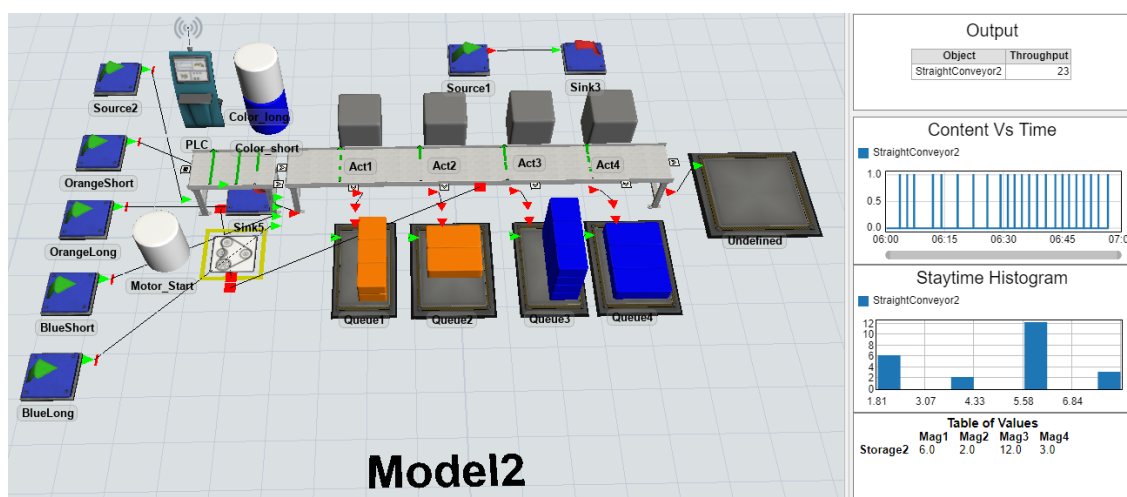
Rys. 1 Linia sortowania zdemontowanych elementów ze sterownikiem PLC.

Źródło: [Opracowanie własne]

Istotna jest także walidacja cyfrowego bliźniaka, potwierdzająca, że dane przesyłane za pośrednictwem przemysłowych interfejsów komunikacyjnych PLC są poprawnie obsługiwane przez oprogramowanie.

#### 4. Konfiguracja eksperymentalna i metoda pomiaru

Przedstawiony eksperyment stanowi konkretną implementację tego podejścia: konfigurację DTiL w sieci lokalnej ze źródłowym modelem FlexSim, wirtualnym sterownikiem PLC firmy Siemens działającym w środowisku PLCSim Advanced oraz wynikowym modelem FlexSim odtwarzającym proces poprzez protokół komunikacyjny S7. Eksperyment oparto na linii sortowania elementów z demontażu (patrz Rys. 1) zamodelowanej w oprogramowaniu FlexSim 2024 (rys. 2). Wcześniejsze prace wykorzystywały to środowisko do rozwoju i wirtualnego uruchomienia logiki PLC [4]. Proces obejmuje transport, czujniki przemysłowe, takie jak fotokomórki oraz operacje ręczne, których czas trwania zależy od wydajności operatora. Założenia obejmują ciągłe zasilanie stanowiska demontażu, bez przerw w pracy. Jest to istotne, ponieważ wprowadza realistyczną zmienność do sekwencji zdarzeń i sprawia, że proces nadaje się do badania wierności czasowej w przypadku nierównomiernego taktu.



Rys. 2. Model cyfrowego bliźniaka w środowisku FlexSim 2024.

Źródło: [Opracowanie własne]

W eksperymencie wierności czasowej wykorzystaliśmy konfigurację dwu-modelową opracowaną we wcześniejszych badaniach SiL/HiL/DTiL [4]. Model źródłowy generował zdarzenia procesowe z cyklu roboczego. Zdarzenia te były przesyłane przez wirtualny sterownik Siemens, a następnie wykorzystywane do sterowania modelem wynikowym, który pełnił rolę cyfrowego bliźniaka. We wcześniejszym badaniu wykorzystano konfigurację sieci lokalnej z oddzielnymi węzłami i sterownikiem wirtualnym. Model źródłowy działał w środowisku FlexSim, warstwa sterowania została zaimplementowana w TIA Portal v19 z PLCSim Advanced v6, a model wynikowy również działał w środowisku FlexSim. Częstotliwość

próbkowania sygnału wynosiła 500 ms, średni cykl PLC wynosił około 2 ms, a opóźnienie między węzłem a routerem wynosiło około 1 ms

Analiza czasowa koncentrowała się na sygnałach fotokomórek związanych z rytmem pracy operatora. Ręczny demontaż i obsługa wprowadzają znaczną zmienność, co utrudnia bezpośredni monitoring operatora, ale pozwala na analizę sekwencji zdarzeń na poziomie automatyki. Sygnały fotokomórek rejestrowane przez sterownik PLC można zatem traktować jako szereg czasowy reprezentujący takt procesu.

Jest to przydatne metodologicznie, ponieważ przesunęła ocenę z ogólnego opóźnienia sieci na czas istotny dla procesu. Pytanie brzmi nie tylko, jak szybko pakiet przemieszcza się przez system, ale także, jak dobrze cyfrowy bliźniak odtwarza sekwencję zdarzeń, która definiuje rytm procesu.

W tym celu zastosowano dwa uzupełniające się typy miar. Pierwszym z nich jest bezwzględne opóźnienie zdarzenia, zdefiniowane jako różnica czasu między wybranym znacznikiem czasu zdarzenia fotokomórki w modelu źródłowym  $t_i^{(1)}$  a odpowiadającym mu znacznikiem czasu w modelu wynikowym  $t_i^{(2)}$ :

$$d_i = t_i^{(2)} - t_i^{(1)} \quad (1)$$

Drugi pomiar opiera się na różnicy czasowej pomiędzy kolejnymi zdarzeniami. Jeśli  $\tau_i^{(1)} = t_{i+1}^{(1)} - t_i^{(1)}$  oraz  $\tau_i^{(2)} = t_{i+1}^{(2)} - t_i^{(2)}$ , to:

$$\Delta\tau_i = \tau_i^{(2)} - \tau_i^{(1)} \quad (2)$$

Głównym powodem analizy  $\Delta\tau_i$  jest redukcja wpływu początkowego niedopasowania zegara. W praktyce oba modele nie zostały uruchomione dokładnie w tym samym momencie, więc porównanie surowych znaczników czasu uwzględniałoby przesunięcie niezwiązane z rzeczywistą jakością replikacji. Porównano również zagregowane statystyki taktu (minimum, średnia i maksimum) obu modeli.

## 5. Wyniki eksperymentu symulacyjnego

Jednogodzinne badanie replikacyjne dostarczyło 23 zarejestrowanych zdarzeń fotokomórek wynikających ze zmiennego taktu pracy operatora podczas demontażu, dla których można było ocenić bezwzględne opóźnienie zdarzeń pomiędzy modelem źródłowym i wynikowym. Podsumowanie wyników eksperymentu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Statystyki bezwzględnego opóźnienia zdarzeń dla badania replikacyjnego trwającego godzinę

| Lp. | Statystyka                   | Wartość   |
|-----|------------------------------|-----------|
| 1   | Liczba zdarzeń               | 23        |
| 2   | Średnie opóźnienie zdarzenia | 0,642 [s] |
| 3   | Mediana opóźnień             | 0,580 [s] |
| 4   | Odchylenie stand.            | 0,241 [s] |
| 5   | Minimum                      | 0,340 [s] |
| 6   | Maksimum                     | 1,350 [s] |

Średnie opóźnienie bezwzględne wyniosło około 0,64 s, podczas gdy maksymalne zaobserwowane opóźnienie osiągnęło 1,35 s a minimalne tylko 0,34 s. Wartości te są zgodne z obserwacjami zgłoszonymi wcześniej dla tej samej konfiguracji w poprzednim badaniu, gdzie przy tych samych ustawieniach obserwowano opóźnienia sygnału wynoszące około 0,3–0,8 s [4]. Niniejsza replikacja dodatkowo pokazuje, że w powtarzanych przebiegach mogą również występować większe wartości odstające sięgające ponad 1s.

W przypadku tej samej jednogodzinnej replikacji w obu modelach dostępne były 22 kompletne interwały między zdarzeniami. Tabela 2 przedstawia odpowiadające im statystyki taktu pracy operatora.

Tabela 2

Porównanie statystyk taktu uzyskanych z kolejnych zdarzeń fotokomórki  
w modelu źródłowym i wynikowym

| Lp. | Model                    | Minimum [s] | Średni takt [s] | Maksimum [s] |
|-----|--------------------------|-------------|-----------------|--------------|
| 1   | Model źródłowy (Model 1) | 101,71      | 144,385         | 285,84       |
| 2   | Model wynikowy (Model 2) | 101,60      | 144,384         | 285,80       |
| 3   | Różnica                  | 0,11        | 0,001           | 0,04         |

Średni takt różni się tylko o około 0,001 s między dwoma modelami. Maksymalny takt różni się o około 0,04 s, a minimalny takt różni się o 0,11 s. Wyniki te pokazują, że pomimo dryftu bezwzględnych znaczników czasu zdarzeń, ogólny rytm procesu jest dobrze odwzorowany. Ta interpretacja jest zgodna z wcześniejszym eksperymentem, w którym największy zaobserwowany błąd mapowania statystyk taktu wyniósł około 0,1 s [4]. Obecna replikacja nie odtwarza dokładnie tych samych wartości zbiorczych, ale prowadzi do tego samego praktycznego wniosku: strumień zdarzeń otrzymany przez PLC zachowuje rytm procesu wystarczająco dobrze, aby można było przeprowadzić analizę opartą na takcie.

Uzyskane poziomy opóźnień należy odczytywać łącznie z parametrami konfiguracyjnymi. Interwał próbkowania sygnału w FlexSim wynosił 500 ms, podczas gdy średni cykl PLC wynosił około 2 ms, a opóźnienie między węzłem a routerem około 1 ms. Oznacza to, że dominującym źródłem widocznego dryftu nie jest samo skanowanie sterownika, ale połączony efekt okresowego próbkowania, odpytywania, logiki aktualizacji modelu i łańcucha komunikacyjnego. Z punktu widzenia użytkownika obserwowane średnie opóźnienie wynoszące 0,64 s jest zatem efektem całej ścieżki replikacji, a nie tylko „opóźnienia sieciowego”.

Warto również zauważyć, że wzór rozbieżności nie jest jednolity we wszystkich miarach zagregowanych. Minimalny takt różni się bardziej widocznie niż wartości średnie i maksymalne, co sugeruje, że krótkie lokalne fluktuacje są bardziej wrażliwe na kolejność próbkowania i aktualizacji niż ogólny rytm obserwowany w dłuższych przedziałach czasu. Ta obserwacja jest zgodna z procesowym charakterem badanego systemu: praca ręczna i zdarzenia wyzwalane przez czujniki tworzą sekwencję, w której mogą pojawić się niewielkie lokalne odchylenia czasowe bez zmiany średniego taktu w dłuższym okresie. Z tego powodu wyniki należy interpretować na dwóch poziomach jednocześnie: opóźnienie zdarzenia pozostaje istotne, gdy istotne są indywidualne

reakcje, ale zachowanie średniego taktu wskazuje, że bliźniak nadal odzwierciedla dominujące tempo procesu.

Z punktu widzenia walidacji przedstawione wyniki wskazują zatem, że wierność należy oceniać na dwóch poziomach. Bezwzględne opóźnienie zdarzenia określa, jak bardzo przesunięty w czasie jest replikowany strumień zdarzeń. Miary między zdarzeniami wskazują, czy ten przesunięty strumień nadal wystarczająco dobrze zachowuje rytm produkcji, aby zachować użyteczność analityczną. W badanym przypadku pierwszy pomiar ostrzega przed zbyt dosłownym traktowaniem ścisłej jednoczesności, podczas gdy drugi potwierdza, że bliźniak nadal dostarcza informacji dla oceny procesu zorientowanej na takt.

### 5.1. Dyskusja wyników

Wyniki potwierdzają główną hipotezę artykułu: w badanym środowisku bezwzględne znaczniki czasu i względne znaczniki czasu nie zachowują się w ten sam sposób. Oceniając jedynie na podstawie surowych opóźnień zdarzeń, można by wnioskować, że synchronizacja jest słaba, ponieważ znaczniki czasu zdarzeń różnią się o kilka dziesiątych sekundy, a czasami o około sekundę. Taki wniosek byłby niepełny. Po przesunięciu analizy w kierunku różnic czasowych między zdarzeniami i reprodukcji taktu, obraz się zmienia. Średni takt obserwowany w obu modelach jest praktycznie identyczny, a nawet skrajne wartości taktu pozostają zbliżone.

W praktyce oznacza to, że model bliźniaczy zachowuje strukturę rytmu procesu znacznie lepiej niż sugerowałyby to same surowe znaczniki czasu. W przypadku monitorowania, analizy przepustowości, badań wąskich gardeł, estymacji taktu operatora lub wykrywania istotnych zmian tempa, taka wierność może być już wystarczająca. To rozróżnienie między bezwzględną synchronizacją a użyteczną wiernością operacyjną jest, naszym zdaniem, głównym wnioskiem z artykułu.

### 6. Podsumowanie i wnioski

W artykule rozszerzono metodologię cyfrowego bliźniaka opartą na symulacji dyskretnej na problem wierności czasowej w systemach produkcyjnych. Zamiast sprowadzać problem do opóźnień protokołu, zbadano, w jaki sposób cyfrowy bliźniak oparty na FlexSim odtwarza synchronizację zdarzeń za pośrednictwem PLC w konkretnym środowisku replikacji DTiL.

Można wyciągnąć trzy wnioski. Po pierwsze, istnieje widoczne opóźnienie bezwzględne: w analizowanej replikacji średnie opóźnienie zdarzeń wyniosło około 0,64 s, a maksymalne opóźnienie około 1,35 s. Po drugie, wartości te nie przekładają się bezpośrednio na wierność operacyjną, ponieważ synchronizacja między zdarzeniami i zagregowane statystyki taktu pozostały bardzo zbliżone w modelu źródłowym i wynikowym. Po trzecie, w przypadku wielu zadań monitorowania i analizy zachowanie rytmu procesu może być ważniejsze niż dokładna równość znaczników czasu.

Przyszłe prace powinny zatem iść w dwóch kierunkach: szersze eksperymenty ze sprzętowymi sterownikami PLC, dłuższe przebiegi i różne częstotliwości próbkowania oraz badania analityczne nad wpływem mierzonych zniekształceń czasowych na

moduły optymalizacji i uczenia się, które wykorzystują cyfrowego bliźniaka jako środowisko obserwacji i wspomagania decyzji. Ponadto przyszłe protokoły walidacji powinny wyraźnie rozróżniać przypadki użycia wymagające dokładności znaczników czasu oraz te, w których bardziej odpowiednim kryterium jest wierne odtworzenie czasu między zdarzeniami.

## LITERATURA

1. Freitas J., Silva P., Costa M.: OPC-UA in digital twins — A performance comparative analysis. In Proc. International Conference on Industrial Informatics, Springer, 2024, p. 145–158. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-61575-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-61575-7_11).
2. Gaffurini L, Bonfante A., Vitturi S.: Characterizing the real-time communication performance of virtual plc in industrial edge platform. IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement, 2025, vol. 4, p. 1–12. <https://doi.org/10.1109/OJIM.2025.3559573>.
3. Itani S., Sharafeddine S.: Toward Industrial Metaverse: A High Fidelity Digital Twin for IIoT With Optimized Age-Accuracy Tradeoff. IEEE Access, 2024, vol. 12, p. 102345–102361, <https://doi.org/10.1109/access.2024.3434630>.
4. Kampa A., Krenczyk D., Michalski P., Paprocka I., Skołud B.: Temporal Fidelity Assessment of a PLC-Mediated Digital Twin for Takt-Time Estimation in Manual Disassembly and Parts Sorting. Appl. Sci. 2026, 16, 7129 <https://doi.org/10.3390/app16147129>.
5. Krenczyk D.: Digital Twins of the Manufacturing System Based on a Simulation Model with Bi-directional Process Data Exchange. In: Burduk A., Batako A., Machado J., Wyczółkowski R., Antosz K., Gola A. (eds) Advances in Production. ISPEM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 790. Springer, Cham, 2023. p. 548–559. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-45021-1\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-031-45021-1_41).
6. Krenczyk D.: Digital Twins of Production Systems Based on Discrete Simulation and Machine Learning Algorithms. In: P. García Bringas et al. (eds), 18th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2023), Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 750, Springer, Cham, 2023, p.57-66. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42536-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42536-3_6).
7. Krenczyk D.: Deep Reinforcement Learning and Discrete Simulation-Based Digital Twin for Cyber–Physical Production Systems. Applied Sciences, 2024, 14(12):5208. <https://doi.org/10.3390/app14125208>.
8. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W.: Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification,” IFAC-PapersOnLine, 2018, vol. 51, no. 11, p. 1016–1022.
9. Negri E., Fumagalli L., Macchi M.: A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. Procedia Manufacturing, 2017, vol. 11, p. 939–948.
10. Sa J., Zhang Y., Wang L.: A digital twin synchronous evolution method of CNC machine tools associated with dynamic and static errors. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, vol. 134, p. 1–15, <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14244-w>.

11. Szántó Z., Sülü A., Bergmann G.: Towards a spatio-temporal expressivity metric for digital twins. In Proc. IEEE International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence, 2023, p.1–6, <http://hdl.handle.net/20.500.14044/38867>.
12. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C.: Digital Twin in Industry: State-of-the-Art, in IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019 vol. 15, no. 4, p. 2405-2415, <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.
13. Touhid M.T.B., Kaiser M.S., Bhuiyan M: Evaluation of digital twin synchronization in robotic assembly using YOLOv8. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024 vol. 135, p. 1–18, <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14182-7>.
14. Voronin A., Martirosyan I., Kulakov S.: Assessment of signal delay in digital twins for electromechanical and hydraulic systems,” in Proc. Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2023, p. 234–239. <https://doi.org/10.1109/uralcon59258.2023.10291155>.
15. Wooley A., Bitencourt J., Silva D.: Bridging the gap between discrete event simulation and digital twin: A manufacturing case study. Manufacturing Letters, vol. 44, p. 1274–1284, 2025. DOI: 10.1016/j.mfglet.2025.06.147.