

Cyfrowy bliźniak siłownika elektrycznego

Streszczenie. W artykule przedstawiona została adaptacja koncepcji cyfrowego bliźniaka na potrzeby stworzenia hybrydowego symulatora siłownika elektrycznego sterującego pracą zaworu regulacyjnego. Dokonano opisu, w jaki sposób został on zaimplementowany oraz zaproponowana została metoda pozwalająca uzyskać dokładniejsze wyniki symulacji. Część badawcza poświęcona jest układowi regulacji przepływu – parametrom regulatora krokowego i ich wpływu na zachowanie się całego układu.

Abstract. The article presents an adaptation of the digital twin concept to create a hybrid simulator of an electric actuator that controls the operation of a control valve. A description was given on how it was implemented and a method was proposed to obtain more accurate simulation results. The research part is focused on the flow control system - the parameters of the step controller and their influence on the behavior of the whole system. (*Digital twin of an electric actuator*).

Słowa kluczowe: cyfrowy bliźniak, hybrydowy symulator, siłownik elektryczny, regulator krokowy.

Keywords: digital twin, hybrid simulator, electric actuator, step controller.

Wstęp

Prężny rozwój przemysłu i automatyzacji stawia coraz większe wyzwania inżynierom w zakresie jakości, szybkości i niezawodności działania różnych urządzeń czy procesów. Wysokie wymagania powodują wzrost skomplikowania technologii i powodują, że integracja świata fizycznego i cyfrowego stała się nieodłącznym elementem przy tworzeniu nowych rozwiązań i nabiera tempa. [1] W odpowiedzi na te potrzeby powstała koncepcja cyfrowego bliźniaka (digital twin) zaprezentowana pierwszy raz przez Michaela Grievesa w 2002 roku. [1, 2, 3] Jednak sam pomysł tworzenia bliźniaczych układów powstał jeszcze w latach 60 XX wieku. W 1970 roku podczas trwania misji Apollo 13 zorganizowanej przez NASA doszło do krytycznego uszkodzenia statku kosmicznego. Najważniejszym czynnikiem powodzenia misji ratunkowej okazał się być fizyczny bliźniak, który pozwolił naukowcom i inżynierom opracować plan działania, sprowadzając astronautów na Ziemię. [2] Obecnie idea digital twin bardzo silnie rozwija się o czym może świadczyć opublikowanie blisko 3000 prac naukowych związanych z tym tematem. [1] Co więcej cyfrowe bliźniaki zostały sklasyfikowane przez firmę Gartner w pierwszej dziesiątce najbardziej obiecujących trendów technologicznych w ciągu nadchodzącej dekady. [1, 4]

Ze względu na stosunkowo młody wiek i ciągły rozwój, nie można doszukać się jednoznacznej definicji cyfrowego bliźniaka. [5, 6] Z punktu widzenia automatyki najtrafniejszą wydaje się ta zaproponowana przez Grievesa, która wyróżnia trzy elementy składowe: fizyczny produkt, jego wirtualną reprezentację i dwukierunkowe połączenia, które umożliwiają przepływ informacji między komponentami rzeczywistymi i cyfrowymi. [3, 7] Przestrzeń wirtualna cyfrowego bliźniaka może składać się z wielu podprzestrzeni. Są to między innymi podprzestrzenie:

- geometryczne – odzwierciedlają wygląd fizycznego obiektu
- fizyczne - opisują fizyczne cechy, charakterystyki i ograniczenia wynikające z rzeczywistego komponentu cyfrowego bliźniaka
- behawioralne – reprezentują dynamikę obiektów, która wynika z ich cech fizycznych, sygnałów sterujących oraz zakłóceń. [1]

Współistnienie tych podprzestrzeni oraz możliwość interakcji między nimi umożliwia wykonywanie różnych operacji w świecie wirtualnym, m.in. modelowania,

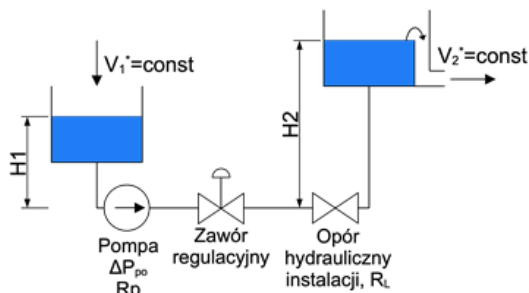
testowania, prognozowania, optymalizacji czy nawet inteligentną diagnostykę awarii. [6]

W tym artykule zostanie przedstawiony cyfrowy bliźniak siłownika elektrycznego sterującego pracą zaworu. Omówiona zostanie jego budowa, która wzoruje się na wcześniej zdefiniowanej koncepcji. Przedstawione również zostaną wyniki jego testów.

Cyfrowy bliźniak jako hybrydowy symulator

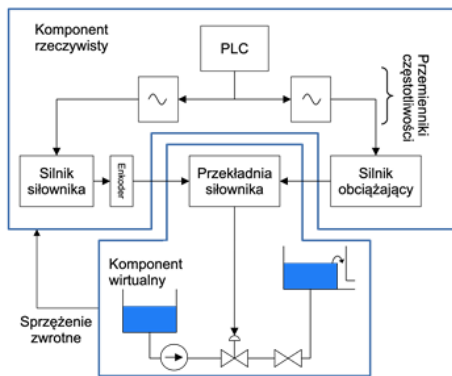
Fizycznym obiektem, na podstawie którego powstał symulator, jest siłownik elektryczny do zaworu regulacyjnego. W jego budowie wyróżnić można dwa główne elementy – silnik elektryczny oraz przekładnię z trzpieniem. W wirtualnej instancji konieczne jest zatem przygotowanie odpowiednich modeli opisujących te elementy. Proces modelowania układu będzie miał istotny wpływ na wyniki symulacji, które powinny jak najdokładniej odpowiadać fizycznemu obiektowi. Sporządzenie dostatecznie dokładnego opisu przekładni siłownika, którą można uznać za element statyczny, nie jest problematyczne. Odwrotna sytuacja występuje w przypadku silnika elektrycznego. Wyznaczenie parametrów jego modelu, nawet przy pewnych założeniach upraszczających, nie jest łatwe. Wykorzystanie w tym miejscu koncepcji cyfrowego bliźniaka rozwiązuje ten problem. Model matematyczny został zastąpiony rzeczywistym silnikiem, który powiązany został z komponentem cyfrowym za pomocą odpowiednich połączeń umożliwiających wymianę informacji między instancją fizyczną i wirtualną. Oczywiście jest, że przeprowadzanie testów i badań na rzeczywistym układzie pozwalałoby uzyskać najlepsze wyniki, jednak może okazać się to drogie i kłopotliwe ze względu na konieczność wykorzystania wielu układów elektrycznych, hydraulicznych i mechanicznych. Dzięki idei digital twin nadal można zagwarantować wysoką dokładność dla całego układu, przy stosunkowo niewielkim wzroście kosztów.

Oprócz realizacji modelu siłownika, zaproponowana również została na potrzeby komponentu cyfrowego instalacja hydrauliczna (rys. 1), w której zawór regulacyjny (sterowany przez siłownik) pełni rolę regulatora przepływu. Dzięki temu możliwe również będzie uwzględnienie wpływu ciśnienia panującego w zaworze, który przełoży się na obciążenie silnika elektrycznego.



Rys. 1. Instalacja hydrauliczna wykorzystana w cyfrowym bliźniaku [8]

Schemat ideowy cyfrowego bliźniaka przedstawiony jest na rysunku 2. Na komponent rzeczywisty składają się: sterownik PLC (Allen-Bradley Compact Logix L16ER), dwa przemienniki częstotliwości (PowerFlex 525), dwa asynchroniczne silniki prądu przemiennego (SEW Eurodrive DRS71S4) sprzężone ze sobą wałami oraz enkoder inkrementalny. Sterownik programowalny pełni dwie role – zarządza pracą pozostałych podzespołów oraz realizuje kod programu wirtualnej instancji cyfrowego bliźniaka. Pierwszy silnik pełni rolę silnika siłownika, a drugi wykorzystany jest jako silnik wytwarzający obciążenie. Przemienniki częstotliwości odpowiedzialne są za sterowanie silnikami. Z kolei enkoder jest elementem łączącym instancje cyfrowego bliźniaka.



Rys. 2. Schemat ideowy hybrydowego symulatora

W skład komponentu symulowanego wchodzi model przekładni siłownika oraz zaproponowana instalacja hydrauliczna. Sprzężenie zwrotne do części rzeczywistej jest informacją o aktualnym ciśnieniu działającym na grzybek zaworu regulacyjnego, które w odpowiedni sposób zostało przeliczone na moment obrotowy jaki wytworzyć musi silnik obciążający.

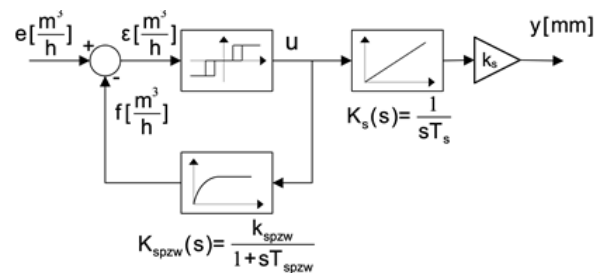
Układ regulacji przepływu

W skonstruowanym układzie, w pętli automatycznej regulacji, do sterowania siłownikiem wykorzystany został regulator krokowy. Decydującym czynnikiem o wyborze tego typu regulatora była przede wszystkim prostota sterowania kierunkiem obrotów silnika. Należy zaznaczyć, że występujący w układzie przemiennik częstotliwości realizuje tylko element cyfrowego bliźniaka i w rzeczywistym przypadku nie jest wymagany. Trójstanowe sterowanie obrotami silnika – „obroty w lewo”, „stop”, „obroty w prawo” - jest łatwe i stosunkowo tanie w wykonaniu, a w połączeniu z innymi atutami siłowników elektrycznych, m. in. łatwym doprowadzeniem zasilania do takiego układu, nawet na duże odległości, może spowodować, że będzie to atrakcyjne rozwiązanie dla użytkownika.

Teoretycznie układ regulacji z regulatorem krokowym powinien charakteryzować się w przybliżeniu odpowiedzią porównywalną z odpowiedzią ciągłego regulatora PI. [9] Jak wskazują niektóre badania, regulacja proporcjonalno-całkująca jest jedną z najpowszechniejszych metod wykorzystywanych w automatyce. Optymalizacja algorytmu regulacji jest ważna i może okazać się skomplikowanym zadaniem. [10] Zadaniem powstałego cyfrowego bliźniaka jest umożliwienie dokładnego zbadania takiego typu układu, co umożliwi optymalny dobór nastaw parametrów regulatora krokowego, które zagwarantują pożądaną dokładność regulacji oraz stabilną i bezpieczną pracę fizycznych podzespołów.

Parametry regulatora krokowego

Regulator krokowy składa się z przełącznika trójpołożeniowego objętego dynamicznym sprzężeniem zwrotnym i silnika elektrycznego, którego wejściem jest uchyb regulacji, a wyjściem przesunięcie trzpienia siłownika (rys. 3).



Rys. 3. Schemat blokowy regulatora krokowego

Jeżeli w pętli sprzężenia zwrotnego obejmującego przełącznik umieszczony zostanie człon inercyjny pierwszego rzędu to uśredniony przebieg wyjściowy regulatora krokowego będzie w przybliżeniu odpowiadał odpowiedzi ciągłego regulatora PI. Przy założeniu, że przełącznik trójpołożeniowy zachowuje się jak wzmacniacz o nieskończonym wzmocnieniu to transmitancja takiego regulatora będzie miała postać [9]:

$$(1) \quad K_{reg}(s) = \frac{\bar{y}(s)}{\bar{e}(s)} \approx \frac{K_s k_s}{K_{spzw}(s)} = \frac{k_s T_{spzw}}{k_{spzw} T_s} \left(1 + \frac{1}{s T_{spzw}} \right)$$

gdzie: K_{reg} – transmitancja regulatora, $y(s)$ – sygnał wyjściowy, e – sygnał wejściowy, k_s – wzmocnienie siłownika, T_s – czas przestawiania siłownika, T_{spzw} – stała czasowa inercji I-go rzędu, k_{spzw} – wzmocnienie inercji I-go rzędu.

Wzmocnienie regulatora opisane jest zatem zależnością:

$$(2) \quad k_{reg} = \frac{k_s T_{spzw}}{k_{spzw} T_s}$$

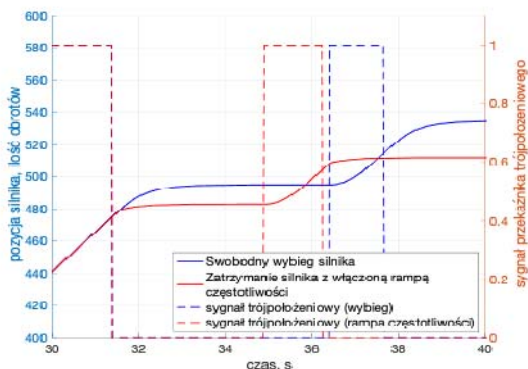
a stała czasowa równa jest:

$$(3) \quad T_I = T_s$$

Stać czasowa T_s siłownika elektrycznego wynika z konstrukcji urządzenia i równa jest czasowi jego przestawiania. Żeby odpowiedź regulatora krokowego odpowiadała odpowiedzi ciągłego regulatora PI należy odpowiednio dobierać wartości wzmocnienia i stałej czasowej obiektu inercyjnego pierwszego rzędu znajdującego się w torze dynamicznego sprzężenia zwrotnego.

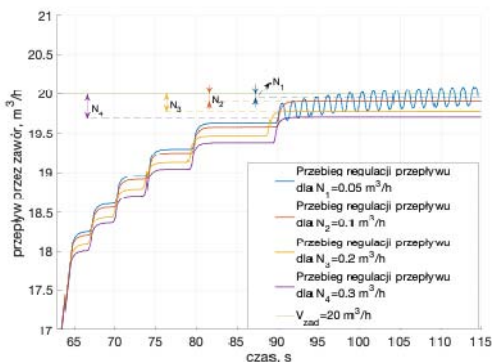
Kontrola wybiegu silnika

Wybieg silnika, który jest naturalnym zjawiskiem pojawiającym się po odłączeniu zasilania, ma wpływ na ustalenie się pozycji siłownika. Na stanowisku laboratoryjnym wały silników nie są połączone z naturalnym obciążeniem. W związku z tym po ich wyłączeniu ich wirniki będą obracać się jeszcze przez jakiś czas. Natomiast przekładnia rzeczywistego siłownika elektrycznego jest samohamująca się, czyli powinna przeciwdziałać wybiegowi silnika. Dzięki przemiennikom częstotliwości możliwe jest zasymulowanie właściwego czasu, po którym nastąpi całkowite zatrzymanie silników – wykorzystanie metody hamowania rampą. Rysunek 4 przedstawia porównanie ustalania się pozycji wału silnika w zależności od wybranej metody hamowania. Pierwszy przebieg (kolor niebieski) zarejestrowany został dla swobodnego wybiegu, a drugi (kolor czerwony) z włączoną opcją rampy częstotliwości.

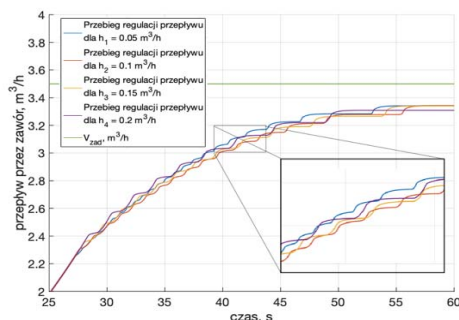


Rys. 4. Porównanie metod hamowania silnika

Nietrudno zauważyć znaczące rozbieżności między przebiegami. Po wyłączeniu zasilania, w przypadku swobodnego wybiegu, wał obraca się jeszcze kilkanaście razy. Natomiast z hamowaniem rampą ilość obrotów po odłączeniu zasilania ograniczona została do zaledwie kilku, co pozytywnie przekłada się na odzwierciedlenie pracy rzeczywistego układu siłownika.



Rys. 5. Badanie wpływu strefy nieczułości na przebieg regulacji



Rys. 6. Badanie wpływu strefy niejednoznaczności na przebieg regulacji

Strefa nieczułości i niejednoznaczności przekaźnika trójpołożeniowego

W rzeczywistości założenie o nieskończonym wzmocnieniu przekaźnika trójpołożeniowego nigdy nie będzie spełnione, a jego parametry mają istotny wpływ na zachowanie się układu. W charakterystyce statycznej przekaźnika trójpołożeniowego wyróżnić można strefę nieczułości N oraz strefę niejednoznaczności (histerezę) h . [9] W celu zbadania jak parametry te wpływają na działanie układu przeprowadzone zostały dwa eksperymenty. W pierwszym sprawdzony został wpływ strefy nieczułości na jakość regulacji (rys. 5), a w drugim wpływ strefy niejednoznaczności (rys. 6). Obydwa badania opierały się na kilkukrotnej obserwacji przebiegu wykresu przepływu przez zawór dla różnych wartości N lub h . Należy zaznaczyć, że w przypadku, gdy zmieniana była wartość jednego parametru, to wartość drugiego pozostawała niezmienna, na przykład w trakcie sprawdzania wpływu strefy nieczułości, jej wartość zmieniała się, to wartość h była zawsze taka sama.

Analizując, jak wpływa wartość strefy nieczułości N można zauważyć, że uchyb regulacji maleje wraz z zmniejszaniem tego parametru. Pożądanym przypadkiem byłoby zatem dobranie jak najmniejszej wartości nieczułości przekaźnika trójpołożeniowego. W praktyce jednak przy sterowaniu różnego typu obiektów należy uwzględnić występującą w nich dynamikę. W cyfrowym bliźniaku taka sytuacja występuje w przypadku silnika elektrycznego i jego wybiegu. Pomimo, że zastosowane jest hamowanie rampą częstotliwości, silnik nadal wymusza przesunięcie trzpienia siłownika jeszcze przez pewien okres po jego wyłączeniu. W związku z tym również występuje jeszcze pewien przyrost wartości regulowanej (w tym przypadku jest to przyrost przepływu ΔV^*). Jeżeli wartość tego przyrostu będzie na tyle duża, że przekroczy ona punkt, w którym przekaźnik trójpołożeniowy załączy silnik w kierunku przeciwnym, może to doprowadzić do wprowadzenia układu w niegasnące oscylacje wokół wartości zadanej. Przypadek ten ilustruje przebieg na rysunku 5 oznaczony kolorem niebieskim. Powstałe oscylacje powodują, że silnik jest regularnie załączany i wyłączany, co z kolei może doprowadzić do skrócenia jego czasu eksploatacji. Należy zatem tak dobrać szerokość strefy nieczułości N , żeby ewentualny przyrost wielkości regulowanej nie przekroczył jej wartości. Zależność tę można opisać następująco:

$$(4) \quad N = \frac{\Delta V^*}{2} - h$$

Na rysunku 6 można zaobserwować, że wraz z zmniejszaniem szerokości strefy histerezy zwiększa się częstotliwość załączania i wyłączania siłownika. Każdy silnik posiada określony czas załączania, którego nie powinno się przekraczać ze względu na trwałość podzespołów urządzenia. Informację o tym czasie można znaleźć często w dokumentacji technicznej urządzenia, a jeżeli nie jest ona dostępna można przyjąć, że minimalny czas załączania nie powinien być krótszy niż stała czasowa silnika.

W regulatorze krokowym załączenie i wyłączenie silnika siłownika zależy od wartości uchybu regulacji oraz wartości dynamicznego sprzężenia zwrotnego. W celu wyznaczenia wartości strefy histerezy, dla której nie zostanie przekroczony minimalny czas załączania silnika należy rozpatrzyć przypadek ostatniego załączenia urządzenia wykonawczego przed osiągnięciem stanu ustalonego (rys. 7). Założeniem również jest, że stała czasowa obiektu podlegającego regulacji (na przykład zbiornik, w którym regulowany jest poziom cieczy) jest zdecydowanie większa

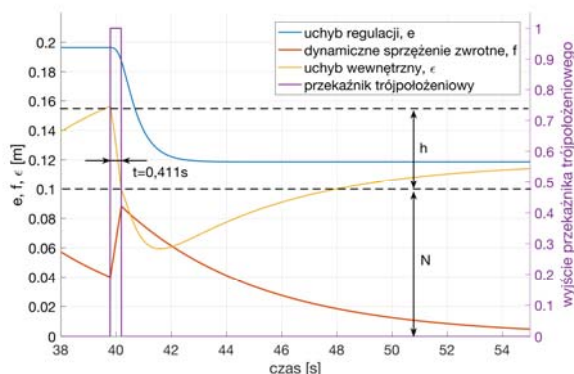
niż stała czasowa regulatora – w takim przypadku dynamika sygnału ε zależy głównie od obiektu inercyjnego I-go rzędu. Wartość wewnętrznego uchybu regulatora jest zbliżona wtedy do sumy strefy niejednoznaczności i nieczułości ($\varepsilon_0=N+h$), a wartość dynamicznego sprzężenia zwrotnego jest bliska zeru ($f_0=0$). W momencie załączenia silnika wartość sygnału ε zacznie zmniejszać się do momentu osiągnięcia wartości strefy nieczułości ($\varepsilon(t)=N$), gdzie nastąpi wyłączenie silnika. Przy przyjętych założeniach przebieg tego sygnału zmienia się zgodnie z zależnością:

$$(5) \quad \varepsilon(t) = \varepsilon_0 - (f_0 - k_{spzw}) e^{-\frac{t}{T_{spzw}}} - k_{spzw}$$

Podstawiając założone wartości i przekształcając odpowiednio równanie otrzymujemy:

$$(6) \quad h = k_{spzw} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{spzw}}} \right)$$

Stała czasowa silnika elektrycznego wykorzystanego na stanowisku laboratoryjnym wynosi 0,4s. Podstawiając tą wartość do zmiennej czasu we wzorze 6 oraz pozostałe wybrane wartości wzmocnienia i stałej czasowej (w przedstawionym przypadku $k_{reg}=2$, $T_I=5$) otrzymujemy, że wartość strefy histerezy powinna wynosić 0,056m. Wartość ta powinna zagwarantować, że czas załączenia silnika nie będzie mniejszy niż 0,4s. W praktyce dobrze jest przyjąć pewien zapas tej wartości mieszczący się w granicach 10 – 20% obliczonej wartości.



Rys. 7. Przebiegi sygnałów w regulatorze krokowym przy ostatnim załączeniu silnika przed osiągnięciem stanu ustalonego

Podsumowanie

Pojęcie cyfrowego bliźniaka jest stosunkowo nowe i ciągle ewoluuje. Skonstruowane stanowisko laboratoryjne pokazuje w jaki sposób koncepcja ta może zostać zaadoptowana i wykorzystana w praktyce. Umieszczenie silnika elektrycznego jako komponentu rzeczywistego korzystnie wpłynęło przede wszystkim na złożoność modelu układu i czas jego przygotowania. Ponadto zastosowanie

przemiennej częstotliwości, dzięki którym wprowadzona została metoda hamowania silników rampą częstotliwości, pozwoliło jeszcze lepiej odwzorować działanie rzeczywistego układu. Natomiast osadzenie przekładni siłownika elektrycznego, zaworu regulacyjnego oraz pozostałych elementów instalacji hydraulicznej w cyfrowej instancji cyfrowego bliźniaka pozwala użytkownikowi w łatwy sposób modyfikować parametry tych elementów i dostosować je do swoich wymagań.

Zaproponowany układ automatycznej regulacji przepływu wykorzystuje klasyczną implementację regulatora krokowego, co nie zmienia faktu, że ten również może zostać zmieniony w celu przetestowania innej metody sterowania. Jak już wcześniej wspomniano, wybór takiego regulatora uargumentować należy przede wszystkim prostotą w sterowaniu siłownika elektrycznego. Przeprowadzone badania pozwalają na odpowiedni dobór nastaw regulatora i parametrów przekładnika trójpołożeniowego, które gwarantują bezpieczną i stabilną pracę siłownika.

Autorzy: inż. Szymon Terczyński, Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: szymter722@student.polsl.pl; dr hab. Inż. Krzysztof Stebel prof. PŚ, Politechnika Śląska w Gliwicach, Katedra Automatyki i Robotyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: krzysztof.stebel@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Tao F., Xiao B., Qi Q., Cheng J., Ji P., Digital twin modeling, *Journal of Manufacturing Systems*, 64 (2022), 372-389
- [2] Ferko E., Bucaioni A., Behnam M., Architecting Digital Twins, *IEEE Access*, 10 (2022), 50335-50350
- [3] Jia W., Wang W., Zhang Z., From simple digital twin to complex digital twin PartI: A novel modeling method for multi-scale and multi-scenario digital twin, *Advanced Engineering Informatics*, 53 (2022)
- [4] Wu J., Yang Y., Cheng X., Cheng Z., Zuo H., The Development of Digital Twin Technology Review, *Chinese Automation Congress*, 2020
- [5] Kherbache M., Maimour M., Rondeau E., Network Digital Twin for the Industrial Internet of Things, *IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, 2022
- [6] Jones D., Sinder C., Nassehi A., Yon J., Hicks B., Characterizing the Digital Twin: A systematic literature review, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29 (2020), 36-52
- [7] Abiola A. Akanmu, Chimay J. Anumba, Omobolanle O. Ogunseiju, Towards Next Generation Cyber-Physical Systems and Digital Twins for Construction, *Journal of Information Technology in Construction*, 26 (2021), 505-525
- [8] Terczyński S. Hybrydowy symulator siłownika elektrycznego, *Politechnika Śląska*, 2023
- [9] Ferenc M., Podstawy automatyki, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, 1981
- [10] Martins J., Fábio F., Dórea C., An optimization-based method for tuning PI controllers for systems subject to control and output constraints, *Przegląd Elektrotechniczny* 12 (2022), 145-153