

ADAM HEYDUK  
JAROSLAW JOOSTBERENS

# Metoda Hardware-in-the-Loop w zastosowaniu do badania układu regulacji prędkości kątowej głowic urabiających kombajnu chodnikowego

*W artykule przedstawiono opis stanowiska badawczego oraz wyniki symulacji metodą Hardware-in-the-Loop przeprowadzonej dla układu regulacji prędkości kątowej głowic urabiających kombajnu chodnikowego. Układ został utworzony w systemie LabView z wykorzystaniem urządzeń cRIO oraz cDAQ. W układzie zastosowano dyskretny regulator typu PI zrealizowany z wykorzystaniem sterownika cRIO. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych w stanach normalnej pracy oraz w stanach awaryjnych.*

Słowa kluczowe: kombajn chodnikowy, regulacja prędkości kątowej, Hardware-in-the-Loop

## 1. WSTĘP

---

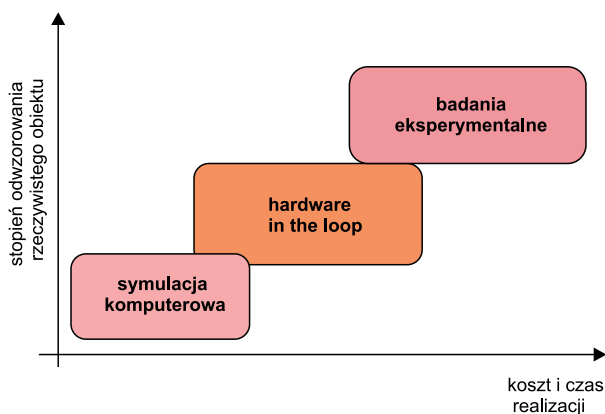
Obciążenie układu napędowego głowic urabiających kombajnu chodnikowego w trakcie urabiania jest zjawiskiem złożonym, zależnym od szeregu czynników. Optymalizacja tego procesu z punktu widzenia zmniejszenia energochłonności i obciążeń dynamicznych wymaga identyfikacji poszczególnych czynników wpływających na jego przebieg. Wymienić tu można przede wszystkim grubość skrawu zależną od rozmieszczenia poszczególnych noży na głowicy urabiającej oraz od prędkości kątowej głowicy, a także jej wychylenia w płaszczyźnie poziomej i pionowej. W dotychczas stosowanych kombajnach chodnikowych prędkość głowicy nie jest regulowana, natomiast wychylenia sterowane są w sposób ręczny. Automatyzacja tego procesu wymaga zastosowania odpowiednich układów regulacji, pracujących w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Dobór struktury i parametrów tych układów może być dokonywany metodami analitycznymi lub symulacyjnymi, jednak praktyczna implementacja tego układu z zastosowaniem odpowiedniego sterownika z wyspecjalizowanym oprogramowaniem wymaga weryfikacji poprawności jego działania. Jedną z metod takiej weryfikacji może być symulacja Hardware-in-the-Loop (HIL).

## 2. ROLA SYMULACJI HARDWARE-IN-THE-LOOP W PROCESIE PROJEKTOWANIA PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH

---

Właściwości funkcjonalne współczesnych układów napędowych z cyfrowo sterowanymi przekształtnikami energoelektronicznymi w istotnym stopniu określone są przez oprogramowanie [1]. Opracowanie i testowanie tego oprogramowania odgrywają zasadniczą rolę w procesie konstrukcji układu napędowego. Badania symulacyjne nieuwzględniające specyfiki docelowego układu, realizującego algorytm sterowania, nie są jednak w stanie wykryć niektórych zjawisk, mogących odgrywać negatywną rolę w późniejszym funkcjonowaniu całego systemu. Rozbieżność między działaniem algorytmu na poziomie symulacji komputerowej i w czasie rzeczywistym (związana np. z ograniczeniami szybkości realizacji programu sterującego, szybkości transmisji sygnałów, ograniczeniami pojemności pamięci czy też ograniczeniami zakresu i precyzji stosowanych zmiennych) może prowadzić, w krańcowym przypadku, do uszkodzenia lub zniszczenia obiektu z powodu np. niestabilności układu sterującego. Ujawnienie tych zjawisk dopiero na etapie

testowania gotowego rozwiązania może wiązać się z dużymi nakładami czasu i kosztów, a nawet z zagrożeniem dla zdrowia i życia ludzkiego [2]. Stąd też coraz większego znaczenia nabierają techniki badań Hardware-in-the-Loop, wykorzystujące rzeczywisty układ sterownika i komputerowy model sterowanego obiektu [3]. Metodę tę można traktować jako rozwiązanie pośrednie pomiędzy badaniami symulacyjnymi w jednolitym środowisku programowym (np. Matlab/Simulink lub Scilab/Scicos), a badaniami doświadczalnymi z wykorzystaniem rzeczywistego sterownika i rzeczywistego obiektu [4–5]. Zależność tę przedstawiono na rysunku 1.

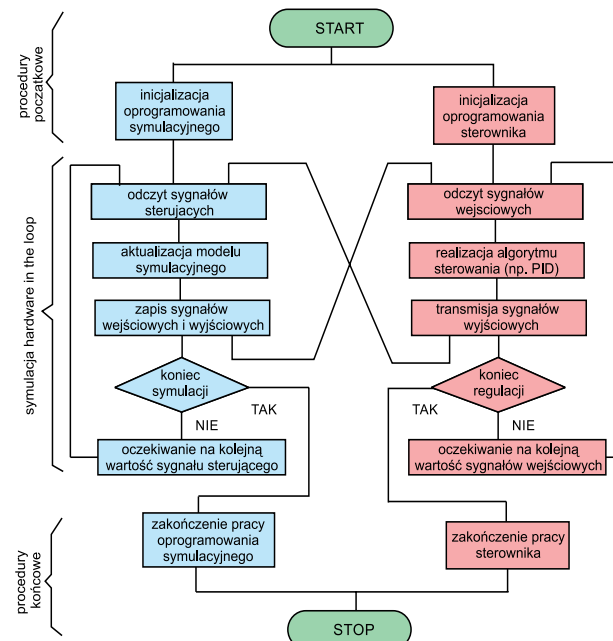


Rys. 1. Porównanie metody Hardware-in-the-Loop z innymi sposobami badań przekształtnikowych układów napędowych (według [1])

Zarówno algorytm regulacji, jak i model sterowanego obiektu realizowane są w postaci cyklicznie wykonywanych pętli programowych, między którymi istnieje wymiana danych odwzorowujących stan modelu sterowanego obiektu oraz generowane przez algorytm sygnały sterujące [6]. Proces ten ukazano schematycznie na rysunku 2.

Zaletą takiego rozwiązania jest także możliwość stosunkowo łatwego i szybkiego przetestowania rzeczywistej reakcji układu sterowania w przewidywanych sytuacjach awaryjnych, charakteryzujących się np. przekroczeniem zakresu dopuszczalnych wielkości wyjściowych, zakłóceniami w transmisji sygnałów lub też błędnym działaniem niektórych czujników. Sprawdzenie działania rzeczywistego układu i oprogramowania sterującego oparte na modelu matematycznego sterowanego obiektu może w istotny sposób ułatwić i skrócić proces uruchamiania całego systemu po połączeniu sterownika z rzeczywistymi elementami wykonawczymi, czujnikami i sterowanym obiektem [3]. Badania metodą Hardware-in-the-Loop

można więc traktować jako prowadzoną w czasie rzeczywistym weryfikację wyników syntezy algorytmu sterowania zrealizowanej na poziomie Model-in-the-Loop (MIL), czyli realizacji algorytmu sterowania, modelu matematycznego obiektu sterowania oraz modeli matematycznych układów wykonawczych i pomiarowych w jednolitym środowisku sprzętowo-programowym w oparciu o zależności opracowane na drodze analizy teoretycznej lub identyfikacji doświadczalnej.



Rys. 2. Przebieg procesu symulacji z wykorzystaniem metody Hardware-in-the-Loop

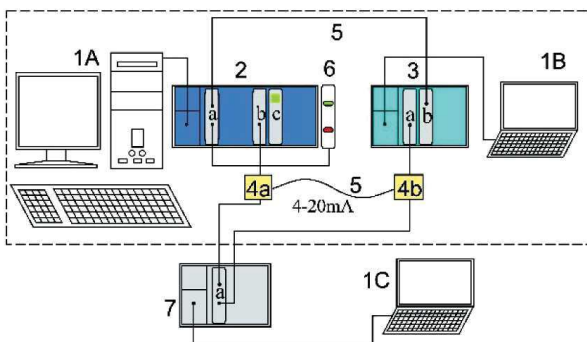
### 3. STANOWISKO LABORATORYJNE DO BADAŃ UKŁADU NAPĘDOWEGO GŁOWIC URABIAJĄCYCH KOMBAJNU CHODNIKOWEGO METODĄ HARDWARE-IN-THE-LOOP

#### 3.1. Struktura stanowiska badawczego

Zbliżenie się do warunków rzeczywistych, w których ma pracować układ sterowania, możliwe jest w przypadku metody HIL i polega na zastosowaniu docelowego sterownika i sprawdzeniu jego działania w układzie z modelem matematycznym obiektu zrealizowanym na osobnej platformie sprzętowej. Istotną cechą tej metody jest to, że sygnały wejścia i wyjścia oraz charakter zmiany tych sygnałów jest zbliżony do sygnałów pomiarowych i sterujących występujących w warunkach i czasie rzeczywistym. Na podstawie wcześniej opracowanych modeli dynamiki

przekształtnikowego układu napędowego wykorzystywane w badaniach symulacyjnych układów regulacji prędkości kątowej głowic urabiających metodą Model-in-the-Loop (MIL), opracowano stanowisko do badań testowych układu sterowania metodą Hardware-in-the-Loop (HIL). Celowość budowy takiego układu związana jest z możliwością przetestowania stosownych algorytmów sterowania w czasie rzeczywistym z użyciem przewidzianego sterownika przemysłowego.

Opracowana koncepcja stanowiska do badań metodą HIL opiera się na dwóch głównych elementach sprzętowych: planowanym do wykorzystania w układzie docelowym sterowniku oraz utworzonym za pomocą oprogramowania LabView na komputerze klasy PC symulacyjnego modelu obiektu sterowania. Model obiektu odwzorowuje układ napędowy głowic urabiających kombajnu chodnikowego wraz z modelem ich obciążenia. Schemat ideowy układu przedstawiono na rysunku 3. Jako interfejs sprzętowy między sterownikiem a komputerem zastosowano układ NI cDAQ-9174 [7] wraz ze stosownymi kartami wejść oraz wyjść analogowych.



Rys. 3. Schemat ideowy stanowiska do testowania systemu sterowania napędu głowic urabiających kombajnu chodnikowego metodą HIL

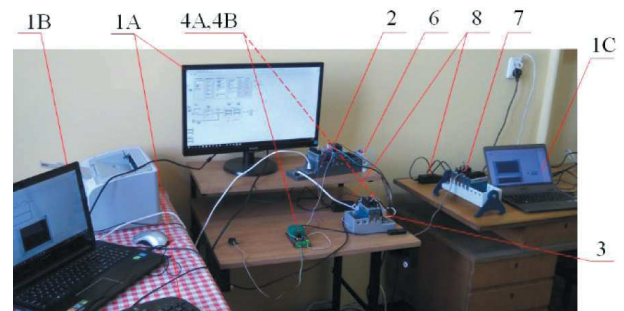
Na podstawie przyjętych założeń koncepcyjnych zostało zaprojektowane i wykonane stanowisko do badań automatycznego układu sterowania prędkości głowic urabiających z wykorzystaniem metody HIL.

Podstawowymi elementami opracowanego i wykonanego stanowiska do badania metodą HIL, pokazanymi na rysunkach 3 i 4, są:

1) komputery klasy PC przewidziane do współpracy z urządzeniami kontrolno-pomiarowymi firmy National Instrument – 1A komputer do współpracy ze sterownikiem cRIO, 1B – komputer do współpracy z cDAQ symulującym rzeczywisty obiekt, 1C – komputer do współpracy z układem cDAQ przeznaczonym do rejestracji, wizualizacji i akwizycji danych pomiarowych;

- 2) sterownik NI cRIO-9074 (2) z kartami: wejść analogowych (a), wyjść analogowych (b) i cyfrowych (c);
- 3) interfejs cDAQ-9174 (3) z kartą wejść analogowych (a) oraz kartą wyjść analogowych (b);
- 4) układ przetwarzający sygnał napięciowy 0–10 V na standard prądowy 4–20 mA (4A) z sygnalizacją przerwania pętli prądowej oraz prosty przetwornik prąd–napięcie (4B);
- 5) ekranowane przewody do transmisji sygnałów sterującego i pomiarowych (5);
- 6) łącznik Fael LP322 (6) ze stykiem niestabilnym normalnie zamkniętym jako element przeznaczony do kasowania zadziałania zabezpieczenia od skutków utraty zdolności sterowania;
- 7) interfejs cDAQ-9174 (7) z kartą wejść analogowych;
- 8) zasilacze (8) poszczególnych urządzeń rejestrująco-kontrolnych NI.

Do pracy w układzie rzeczywistym regulacji prędkości kątowej głowic przewidziany został sterownik NI cRIO-9074 (2) [8]. Jako wejście sterownika zastosowano 32-kanalowy 16-bitowy moduł wejść analogowych serii NI 9205 o zakresie napięciowym  $\pm 10$  V i maksymalnej częstotliwości próbkowania 250 kS/s [9]. Wyjście sterownika utworzono, stosując czterokanałowy moduł wyjść analogowych NI 9263 o zakresie napięciowym  $\pm 10$  V oraz maksymalnej częstotliwości próbkowania 100 kS/s dzielonej na kanał [10]. Do sprzętowego zamodelowania obiektu rzeczywistego posłużył układ cDAQ-9174 (3) wyposażony w czterokanałowy moduł wyjść analogowych NI 9215 o zakresie napięciowym  $\pm 10$  V i maksymalnej częstotliwości próbkowania 150 kS/s dzielonej na kanał oraz identyczny moduł wyjść analogowych, jak w sterowniku cRIO. Dodatkowo wprowadzono kartę wyjść cyfrowych służącą do sygnalizacji wystąpienia stanu awaryjnego serii NI 9474. Widok stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Widok stanowiska do badań testowych z wykorzystaniem metody HIL

### 3.2. Transmisja sygnału sterującego między sterownikiem a modelem obiektu

Jednym z istotnych czynników decydujących o prawidłowej pracy układu sterowania jest transmisja sygnału sterującego między regulatorem a elementem wykonawczym. Transmisja ta musi przebiegać w sposób niezawodny, czyli niewrażliwy na zakłócenia oraz dopasowany do struktury układu regulacji pod względem dynamiki (częstotliwość oraz regularność przesyłania sygnału) i odległości między regulatorem a elementem wykonawczym. Sposób ten musi być również dostosowany do możliwości generowania sygnału przez regulator oraz odczytu tego sygnału przez element wykonawczy (w tym przypadku przemiennik częstotliwości wyposażony w sterownicze wejście analogowe).

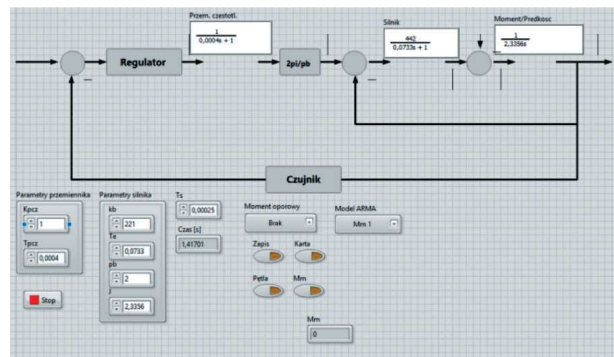
Do transmisji sygnału sterującego wybrano standard pętli prądowej, gdyż ze względu na większą impedancję wyjściową nadajnika sygnału i mniejszą impedancję wejściową odbiornika jest on znacznie bardziej odporny na zakłócenia elektromagnetyczne niż przesył sygnału napięciowego. Ograniczenie zakresu przesyłanego sygnału do wartości 4–20 mA umożliwia łatwe wykrycie przerwania pętli prądowej, czyli zaniku sygnału sterującego, powodujące utratę sterowalności układu. W tej sytuacji następuje szybkie wyłączenie przemiennika częstotliwości i odpowiednia sygnalizacja zaistniałego zdarzenia. Interfejs pętli prądowej został zrealizowany z wykorzystaniem układu nadajnika AD694 firmy Analog Devices. Umożliwia on konwersję sygnału napięciowego z zakresu 0–10 V (co jest zgodne z poziomem napięć wyjściowych karty NI 9263) na sygnał prądowy 4–20 mA z nieliniowością nieprzekraczającą 0,002% [11]. Układ ten wyposażony jest w system detekcji sygnalizacji przerwy w linii sygnałowej oraz wewnętrzne źródła napięcia odniesienia – 2000 V i 10 000 V.

## 4. WYNIKI BADAŃ STANOWISKOWYCH UKŁADU REGULACJI NAPĘDU GŁOWIC URABIAJĄCYCH METODĄ HIL

### 4.1. Wyniki badań regulacji prędkości kątowej głowic urabiających w warunkach zmian momentu obciążenia

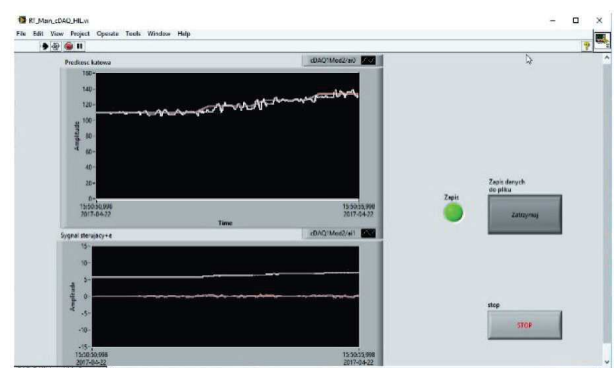
Zmontowane i przetestowane stanowisko posłużyło do szeregu badań układu regulacji prędkości kątowej

wej głowic urabiających kombajnu prowadzonych w czasie rzeczywistym w warunkach kontrolowanych przeciążeń dynamicznych i statycznych, uwzględniających realne warunki pracy maszyny oraz mogące wystąpić stany awaryjne. Regulator prędkości kątowej został zaimplementowany w sterowniku NI cRIO-9074 z wykorzystaniem modułu FPGA [12, 13]. W układzie FPGA występuje jednokierunkowy przepływ sygnałów, co spełnia wysokie wymagania dotyczące szybkości i pewności działania sterownika w czasie rzeczywistym. Model kombajnu z przekształtnikowym układem napędowym został zaimplementowany z wykorzystaniem urządzenia NI cDAQ-9174. Widok Front Panelu modelu kombajnu przedstawiono na rysunku 5.



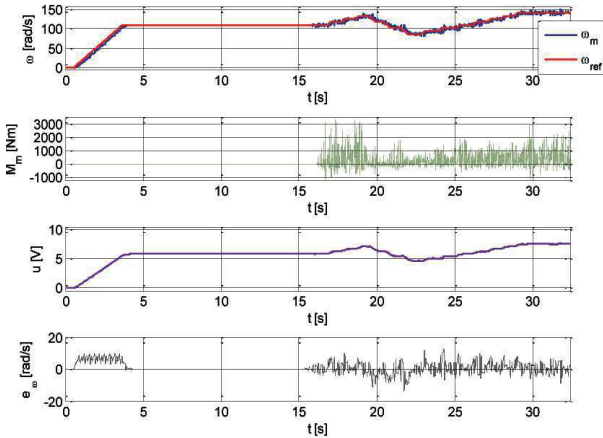
Rys. 5. Widok Front Panelu oprogramowania modelu układu napędowego kombajnu chodnikowego

Wartości sygnałów wejściowych i wyjściowych rejestrowane były przez odrębny układ NI cDAQ (poz. 7 na rys. 3 i 4) oprogramowany w środowisku LabView. Front Panel programu rejestrującego przedstawiono na rysunku 6.



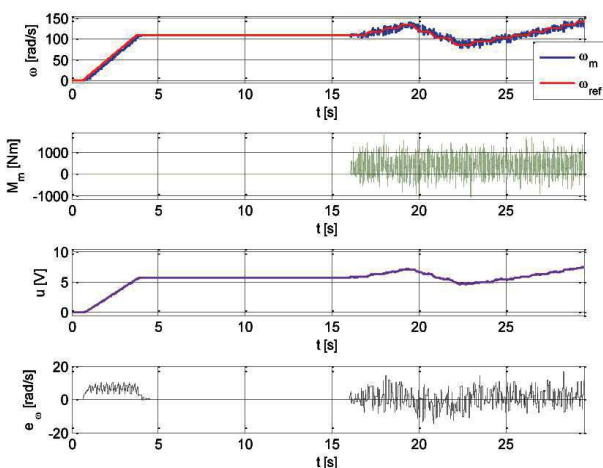
Rys. 6. Widok Front Panelu oprogramowania rejestrującego podczas przykładowych testowych badań stanowiskowych układu regulacji prędkości kątowej głowic metodą HIL

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badań układu z momentem oporowym (odzwierciedlającym opory ruchu obrotowego poszczególnych elementów układu oraz opory skrawania skały) zadawanym programowo na podstawie bezpośrednio zarejestrowanych danych.



Rys. 7. Odtwarzane podczas badań metodą HIL przebiegi czasowe wartości zadanej  $\omega_{ref}$  i prędkości kątowej  $\omega_m$  modelu układu napędowego obciążonego momentem oporowym  $M_m(t)$  o przebiegu bezpośrednio zarejestrowanym podczas badań stanowiskowych

Kolejny etap badań obejmował pracę układu przy zróżnicowanych wartościach momentu obciążenia wygenerowanych przez model ARMA o współczynnikach zidentyfikowanych na podstawie badań doświadczalnych. Wyniki przykładowej symulacji przedstawiono na rysunku 8.



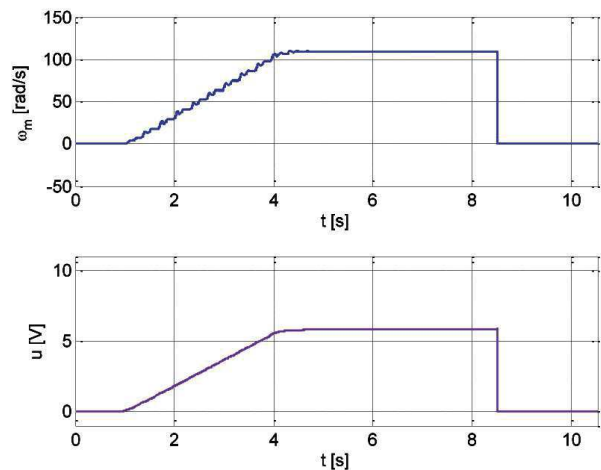
Rys. 8. Odtwarzane podczas badań metodą HIL przebiegi wartości zadanej  $\omega_{ref}$  i prędkości kątowej  $\omega_m$  modelu układu napędowego obciążonego momentem oporowym  $M_m(t)$  w postaci ciągu czasowego wygenerowanego z wykorzystaniem modelu ARMA

## 4.2. Wyniki badań układu zabezpieczeń przed skutkami stanów awaryjnych

Jednym z istotnych celów badań symulacyjnych metodą HIL jest sprawdzenie reakcji oprogramowania na mogące wystąpić w pracy rzeczywistego układu regulacji stany awaryjne, które nie mogą pozostać bez reakcji sterownika. Stany awaryjne wiążą się z utratą zdolności sterowania. Można tu przykładowo wymienić następujące sytuacje:

- zanik lub zakłócenia sygnałów z czujników pomiarowych (np. czujnika prędkości);
- zanik lub zakłócenia transmisji do elementów wykonawczych (np. przemiennika częstotliwości);
- utrata stabilności układu, czyli oscylacje wielkości wyjściowych na skutek rozbiegania się układu;
- zadziałanie wewnętrznych zabezpieczeń nadprądowych w elemencie wykonawczym (przemienniku częstotliwości).

Wybrane stany awaryjne zostały zasymulowane na stanowisku badawczym. W ramach badań testowych dokonano sprawdzenia działania modułu programowego zabezpieczeń w sytuacji przerwania ciągłości torów układu sterowania, zarówno toru regulacji, jak i toru sprzężenia zwrotnego. Reakcję układu zabezpieczeń na zanik sygnału prędkości w pętli sprzężenia zwrotnego przedstawiono na rysunku 9.

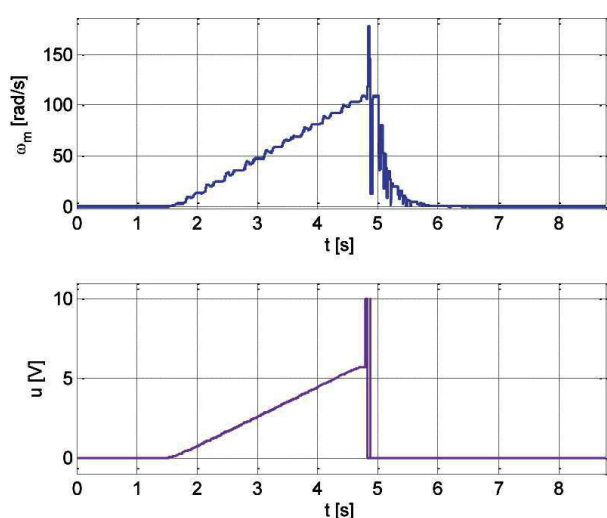


Rys. 9. Przebiegi czasowe prędkości kątowej  $\omega_m$  oraz sygnału sterującego  $u$  w sytuacji przerwania pętli sprzężenia zwrotnego (zanik sygnału z czujnika prędkości)

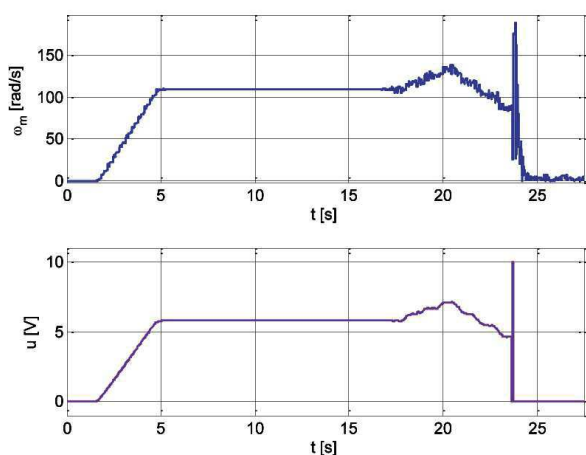
Utratę stabilności układu osiągnięto przez skokowe zwiększenie wartości nastaw regulatora w trakcie pracy systemu. Utrata stabilności charakteryzuje się powstawaniem oscylacji o dużej amplitudzie, stąd też jako kryterium detekcji stanu zakłóceniewego przyjęto

przekroczenie granicznej wartości odchyłki między zadaną a rzeczywistą wartością prędkości kątowej. W każdym z wymienionych stanów awaryjnych reakcja sterownika powinna dążyć do sprowadzenia sygnału sterującego (na wyjściu sterownika) do zera. Zapewnione powinno być również sygnalizowanie wystąpienia stanu awaryjnego oraz wykluczenie możliwości ponownego bezpośredniego uruchomienia urządzenia sterującego przy zaistniałym uszkodzeniu.

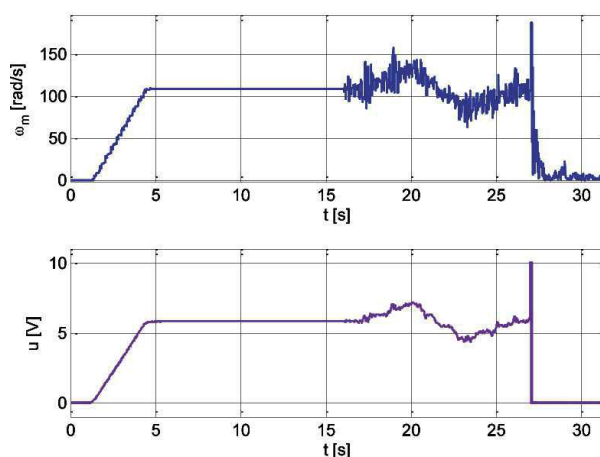
Reakcję układu zabezpieczeń na utratę stabilności podczas rozruchu systemu przedstawiono na rysunku 10, a reakcję układu sterowania na utratę stabilności przy obciążeniu momentem oporowym przedstawiono na rysunkach 11 i 12.



Rys. 10. Przebiegi czasowe prędkości kątowej  $\omega_m$  oraz sygnału sterującego  $u$  w sytuacji wykrycia oscylacji prędkości na skutek utraty stabilności podczas rozruchu napędu



Rys. 11. Przebiegi czasowe prędkości kątowej  $\omega_m$  oraz sygnału sterującego  $u$  w sytuacji wykrycia oscylacji prędkości na skutek utraty stabilności przy zmniejszającym się obciążeniu



Rys. 12. Przebiegi czasowe prędkości kątowej  $\omega_m$  oraz sygnału sterującego  $u$  w sytuacji wykrycia oscylacji prędkości na skutek utraty stabilności w warunkach narastającego obciążenia

## 5. PODSUMOWANIE

Wyniki badań układu sterowania z regulatorem  $PI$  (o nastawach wyznaczonych metodą symulacji MIL) zaimplementowanego w sterowniku  $cRIO$  i współpracującego z symulacyjnym cyfrowym modelem układu napędowego kombajnu, wykazują znaczne podobieństwo z wcześniej uzyskiwanymi wynikami wyznaczonymi metodą MIL. Również zaimplementowane algorytmy zabezpieczeń przed skutkami stanów awaryjnych okazały się efektywne, szybko reagując na zakłócenia i awarie pojawiające się w trakcie pracy kombajnu. Wskazuje to na poprawność opracowania przyjętego algorytmu sterowania i jego implementacji programowej, zastosowanej w sterowniku przewidzianym do pracy w rzeczywistym układzie.

### Podziękowania

Praca zrealizowana w ramach projektu badawczego pt. „Sterowanie ruchem głowic urabiających kombajnu chodnikowego dla potrzeb obniżenia energochłonności urabiania i obciążeń dynamicznych”, dofinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych (umowa nr PBS3/B2/15/2015).

### Literatura

- [1] Sarhadi P., Yousefpour S.: *State of the art: hardware in the loop modeling and simulation with its applications in design, development and implementation of system and control software*, „International Journal of Dynamics and Control” 2015, 3: 470–479.

- [2] Jaszczak S.: *Procedura Hardware-in-the-Loop w syntezie algorytmów sterowania*, „Pomiary – Automatyka – Kontrola” 2010, 56, 7: 685–687.
- [3] Pietruszewicz K.: *Projektowanie mechatroniczne. Technika Hardware-in-the-Loop a założenia Industry 4.0*, „Napędy i Sterowanie” 2016, 4: 92–98.
- [4] Bouscayrol A.: *Hardware-in-the-Loop simulation*, Industrial Electronics Handbook, 2nd ed., Vol. 3, Chapter 35, Taylor & Francis, Chicago 2011.
- [5] Bouscayrol A.: *Hardware-in-the-Loop simulation*, Electric Vehicle Symposium EVS’24, Stavanger 2009.
- [6] Maclay D.: *Simulation gets into the loop*, „IEEE Review” 1997, 43, 3: 109–112
- [7] *NI cDAQ™-9174 Four-Slot USB Chassis Specifications*, National Instruments, 2013.
- [8] *NI cRIO-9074XT Reconfigurable Embedded Chassis with Integrated Intelligent Real-Time Controller*, National Instruments, 2016.
- [9] *NI 9205 Datasheet 16 AI Differential/32 AI Single-Ended, ±200 mV to ±10 V, 16 Bit, 250 kS/s Aggregate*, National Instruments, 2015.
- [10] *NI 9263 Datasheet 4 AO, ±10 V, 16 Bit, 100 kS/s/ch Simultaneous*, National Instruments, 2016.
- [11] *AD694 4-20mA transmitter: Datasheet Rev B*, Analog Devices Inc, 2002.
- [12] Ponce-Cruz P., Molina A., MacCleery B.: *Fuzzy Logic Type 1 and Type 2 Based on LabVIEW™ FPGA*, Springer International Publishing, Heidelberg 2016.
- [13] Baran E.D.: *LabVIEW FPGA. Rekonfigurujemy izmierzalne i upravlajuszczije sistemy*, „DMK Priess”, Moskwa 2009.

dr inż. ADAM HEYDUK

dr inż. JAROSŁAW JOOSTBERENS

Katedra Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej

Wydział Górnictwa i Geologii

Politechnika Śląska

ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice

{Adam.Heyduk, Jaroslaw.Joostberens}@polsl.pl