

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/311984218>

STANOWISKO DO TESTOWANIA UKŁADÓW STEROWANIA TEMPERATURĄ W KABINIE LAKIERNICZEJ W TRYBIE....

Article · December 2016

CITATIONS

0

READS

30

2 authors:



Piotr Nikończuk

West Pomeranian University of Technology, S...

70 PUBLICATIONS 135 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sławomir Jaszczak

West Pomeranian University of Technology, ...

26 PUBLICATIONS 29 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Energy Efficiency of Refinishing Spray Booth [View project](#)



A control system of a novelty refrigeration unit [View project](#)

STANOWISKO DO TESTOWANIA UKŁADÓW STEROWANIA TEMPERATURA W KABINIE LAKIERNICZEJ W TRYBIE HARDWARE IN THE LOOP

Istotnym walorem symulacji hardware in the loop, jest możliwość testowania układu sterowania w układzie czasu rzeczywistego w bezpiecznych warunkach. W testach wykorzystywany jest model obiektu wraz z elementami układu wykonawczego. W artykule przedstawiono metodykę hardware in the loop z odwołaniem do wykorzystywanych narzędzi wspomagających. Zaprezentowano implementację metody dla układu sterowania temperaturą w renowacyjnej kabinie lakierniczej. Omówiono strukturę stanowiska badawczego z wybranymi szczegółami odnośnie integracji sprzętowej i implementacji oprogramowania. Przedstawiono przykładowe przebiegi symulacji układu z zamodelowanymi zakłóceniami.

WSTĘP

Istotną rolę w trakcie projektowania układów regulacji odgrywa symulacja komputerowa z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania, która umożliwi szybkie sprawdzenie przyjętych modeli matematycznych dla obiektu regulacji, urządzeń wykonawczo-nastawczych i urządzeń pomiarowych. Dodatkowo możliwe jest przeprowadzenie weryfikacji działania algorytmu sterowania w warunkach pseudorzeczywistych, dzięki możliwości symulacji wspólnego działania wszystkich elementów układu sterowania. Takie podejście nosi nazwę procedury model in the loop (MIL) i jest stosowane wówczas, gdy nie ma bezpośredniego dostępu do obiektu sterowania. Pozytywna weryfikacja zaprojektowanego algorytmu stanowi podstawę do implementacji na wybranej platformie wykonawczej np. z wykorzystaniem sterownika programowalnego PLC.

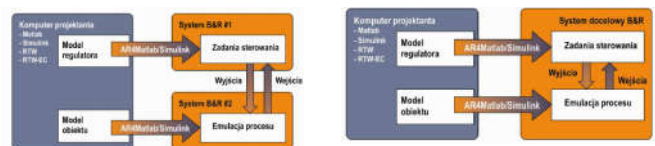
Testowanie systemu sterującego, zgodnie z procedurą MIL, charakteryzuje się tym, że model procesu fizycznego i model układu sterującego są symulowane za pomocą specjalistycznego narzędzia z wykorzystaniem komputera. Ich celem jest sprawdzenie czy układ regulacji został zbudowany poprawnie i czy działa on zgodnie z wymaganiami. Technika MIL pozwala jednocześnie na pozyskanie referencyjnych sygnałów wejściowych i wyjściowych, które mogą później posłużyć do weryfikacji rzeczywistego urządzenia. Symulacja nie musi odbywać się w czasie rzeczywistym ponieważ nie występują tutaj żadne komponenty sprzętowe [8].

Dodatkową cechą MIL jest możliwość osobnego testowania modeli obiektu oraz modelu regulatora, stosując jako sygnały wejściowe skok o określonej amplitudzie lub inny typ sygnału. Po wstępnych próbach na każdym z obiektów można połączyć oba modele za pomocą sygnałów wejściowych i wyjściowych i przetestować pracę regulatora i zachowanie się obiektu.

Najczęściej w etapie tym występuje wiele błędów, związanych z błędami programisty, co powoduje trudności w weryfikacji działania algorytmu w warunkach rzeczywistych. Zastosowanie szybkiego prototypowania w fazie początkowej wyklucza błędy związane z kodowaniem przez, co upraszcza pracę projektanta, który może skoncentrować się na optymalizacji algorytmu bądź jego modyfikacji przez co poprawia w znacznym stopniu jakość uzyskanego programu.

W wyniku powiązania procedury MIL z eksperymentem w czasie rzeczywistym otrzymujemy procedurę hardware in the loop [6],

która oznacza, że oprogramowanie reprezentujące określony algorytm sterowania, jak również model obiektu uruchamiane jest na docelowej platformie sprzętowej. Symulacje przeprowadza się więc poprzez wykorzystanie rzeczywistego sterownika z algorytmem sterującym, który docelowo ma być również zainstalowany w projektowanej jednostce sterującej procesem. Obiekt natomiast podobnie jak to było w przypadku MIL reprezentowany jest za pomocą tego samego modelu matematycznego. W praktyce algorytm sterujący i model obiektu może być uruchomiony na jednym sterowniku, wówczas wymiana danych pomiędzy algorytmem sterującym a modelem odbywa się w oparciu o określone zmienne. Inna bardziej realistyczna możliwość, wiąże się z uruchomieniem algorytmu sterującego na jednym sterowniku, natomiast model obiektu, symulowany jest na drugim sterowniku, co przedstawiono na rys.1.



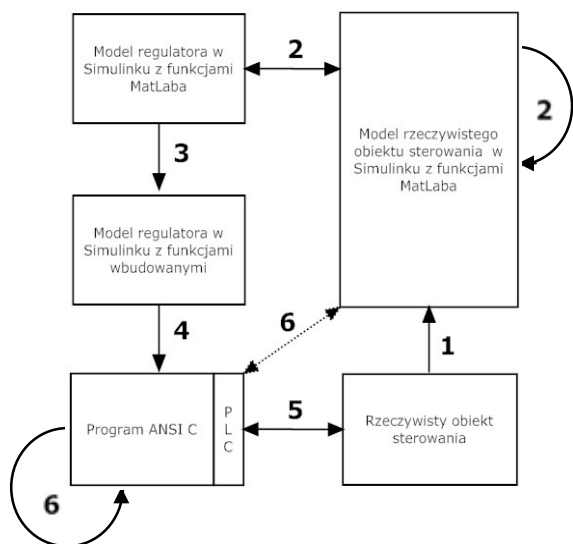
Rys. 1. Ilustracja procedury hardware in the loop [6].

Komunikacja pomiędzy platformą algorytmu sterującego a platformą symulacji modelu odbywa się za pomocą typowych, przemysłowych interfejsów I/O. przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych oraz układów wejść i wyjść dyskretnych tj. dwustanowych. Celem symulacji HIL jest więc weryfikacja funkcjonowania algorytmu na docelowym sterowniku programowalnym. Ma to na celu również sprawdzenie kompatybilności oprogramowania i sprzętu. Symulacja odbywa się w czasie rzeczywistym [8].

Popularnym oprogramowaniem w środowisku akademickim, umożliwiającym prowadzenie badań symulacyjnych w trybie MIL jest Matlab-Simulink. Dostępność bibliotek, jak również możliwość konstruowania i testowania własnych rozwiązań sprawia, że jest to idealne oprogramowanie, wspomagające proces syntezy układów automatycznej regulacji, które ponadto umożliwia łatwe porównywanie własnych algorytmów z algorytmami udostępnianymi w repozytoriach i omawianych w publikacjach naukowych. Z uwagi na otwartość środowiska dostępne są również biblioteki tzw. toolbox'y firm zewnętrznych, umożliwiające integrację Simulinka ze sprzętem sterujących konkretnego producenta. Jedną z takich

propozycji jest B&R Automation Studio Target for Simulink, przyborek, umożliwiający automatyczne generowanie modeli, wykonanych w Simulinku do kodu w ANSI C, uruchamianego bezpośrednio w systemie operacyjnym czasu rzeczywistego sterownika PLC tj. Automation Runtime.

Na rysunku 2 przedstawiono podstawowe procedury projektowe wykorzystujące Matlab – Simulink wraz z B&R Automation Studio Target for Simulink.



Rys. 2. Metodyka projektowania z wykorzystaniem B&R Automation Studio Target for Simulink. 1.Identyfikacja doświadczalna lub teoretyczna, 2. Procedura Model In The Loop, 3.Wyposażenie modelu w funkcje B&R Automation Studio, 4.Wygenerowanie kodu programu na docelową platformę wykonawczą, 5. Sterowanie w czasie rzeczywistym, 6. Symulacja - Hardware In the Loop [6].

Przedstawione techniki symulacyjne są używane na ogół na różnych etapach wykonywania projektu. Technika MIL może być zastosowana już w bardzo wczesnym etapie, kiedy dysponujemy ogólną wiedzą na temat projektu. Nie znamy wówczas jeszcze architektury oprogramowania i platformy sprzętowej, ale już można stwierdzić czy układ będzie spełniał swoje zadania. W momencie, kiedy pierwsze prototypy rozwiązania są już gotowe możliwe jest przejście do procedury HIL w bardzo szybki sposób [8].

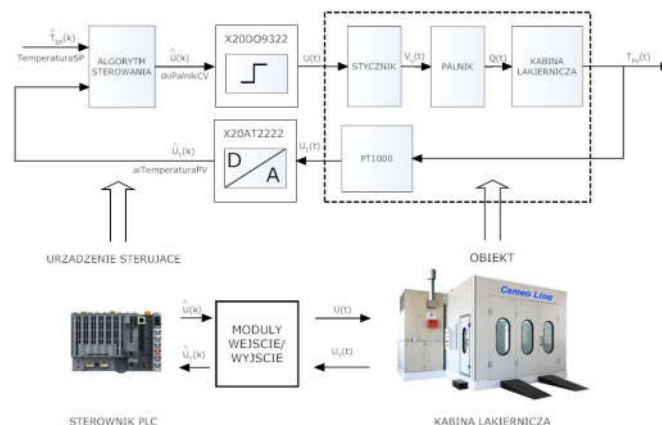
Jak już wcześniej wspomniano kluczową sprawą w procedurze MIL oraz HIL są modele matematyczne, określające charakterystykę procesu i mające odzwierciedlać ich stan faktyczny w możliwie jak największym stopniu. Aby tak było zachodzi konieczność identyfikacji regulowanego obiektu na podstawie danych pomiarowych lub też przyjęcie modeli standardowych dostępnych w literaturze. Można oprzeć na modelach przybliżonych, typowych w praktyce przemysłowej. Dlatego też dla przedstawienia procedur MIL i HIL wykorzystany został własny model matematyczny zbliżony do modelu kabiny lakierniczej jako obiektu sterowania [7].

1. CHARAKTERYSTYKA UKŁADU STEROWANIA

Typowa kabina lakiernicza może pracować w dwóch trybach roboczych tj. lakierowanie i suszenie, które zostały od strony technologicznej omówione w [2,3,4]. Niezależnie od trybu pracy kabiny wymagane są : stabilizacji nadciśnienia oraz stabilizacji temperatury. Dodatkowo system sterowania, odpowiadający za utrzymywanie nadciśnienia powinien zapewniać normatywną liczbę wymian powietrza dla zachowania bezpiecznego składu powietrza wewnątrz kabiny. Praktycznie przedstawione układy sterowania są realizowa-

ne w osobnych pętlach sterowania przy wykorzystaniu niezależnych algorytmów sterowania, które są wykonywane za pomocą jednego sterownika tj. w układzie scentralizowanym. Z praktycznego punktu widzenia należy wziąć pod uwagę fakt, iż układ stabilizacji nadciśnienia, odpowiadający za wymianę powietrza wewnątrz kabiny, jest źródłem istotnych zakłóceń wartości temperatury, szczególnie w okresie jesienno-zimowym, kiedy temperatura powietrza zewnętrznego jest dużo niższa od temperatury powietrza w kabinie.

Na rysunku 3 przedstawiono planowany system sterowania temperaturą w kabinie lakierniczej, wykorzystujący jednostopniowy palnik, regulowany dwustanowo. Pomiar temperatury będzie zrealizowany za pomocą sondy PT1000 i modułu AT2222. Zastosowany palnik determinuje algorytm sterowania, w tym przypadku można wykorzystać algorytm dwustanowy (rys.4) lub inne alternatywne techniki regulacji automatycznej z funkcjonalnością on/off, jak np. algorytm modulacji PWM [5].

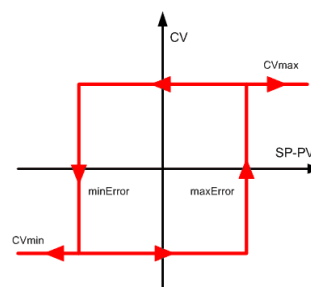


Rys. 3. Elementy planowanego rzeczywistego układu stabilizacji temperatury w kabinie lakierniczej [opracowanie własne]

W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę zmiennych i sygnałów, wykorzystywanych w układzie sterowania z rysunku 3.

Tab. 1. Charakterystyka zmiennych i sygnałów w układzie stabilizacji temperatury kabiny lakierniczej [opracowanie własne]

Sygnal/zmienna	Opis	Jednostka/Typ
TemperaturaSP	Temperatura zadana	INT
doPalnikCV	Zmienna reprezentująca sygnał sterujący	BOOLEAN
U(t)	Sygnal sterujący	VDC
aiTemperaturaPV	Zmienna reprezentująca sygnał sterowany	INT
$T_{pv}(t)$	Sygnal sterowany	°C
$V_u(t)$	Sygnal wykonawczy	VAC
Q(t)	Sygnal nastawczy (strumień ciepła)	W



Rys. 4. Charakterystyka statyczna algorytmu dwustanowego, gdzie: CV_{max} – amplituda sygnału sterującego w stanie ON, CV_{min} – amplituda sygnału sterującego w stanie OFF, $minError$, $maxError$ – odpowiednio wartość błęd dla stanu OFF i dla stanu ON. W praktyce zwykle: $minError = -maxError$. [opracowanie własne]

2. OPRACOWANIE ELEMENTÓW SYMULACJI HARDWARE IN THE LOOP

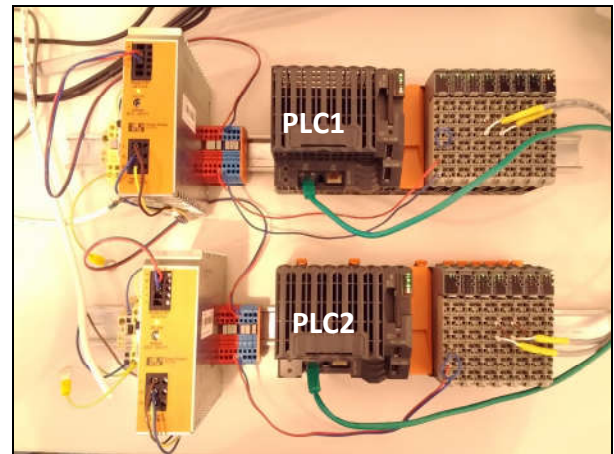
W oparciu o zaplanowaną strukturę rzeczywistego układu stabilizacji temperatury w kabine lakierniczej przygotowano stanowisko badawcze, przedstawione na rysunku 5, umożliwiające przeprowadzenie symulacji HIL.

PLC1 sterujący pracą kabin lakierniczej wysyła dwustanowy sygnał sterujący do PLC2 w funkcji obiektu regulacji, który odbiera sygnał poprzez wejście dwustanowe modułu DI9322. Dyskretny charakter sygnału sterującego wynika z zastosowanego dwustanowego urządzenia wykonawczego tj. palnika (rys.3). Następnie sygnał sterowany, jest wysyłany poprzez kanał cyfrowo-analogowy PLC2 do PLC1, który odbiera ten sygnał przez kanał analogowo-cyfrowy. Sygnał sterujący może przyjmować dwa stany 0 lub 24 VDC, natomiast sygnał sterowany może zmieniać się w zakresie 0-10 VDC, z rozdzielczością 0.000031 VDC, wynikająca z rozdzielczości przetworników analogowo-cyfrowego i cyfrowo-analogowego.

Przed przystąpieniem do testowania działania elementów układu sterowania z obiektem rzeczywistym, możliwe jest przeprowadzenie testów zgodnie z procedurą HIL, w oparciu o dokładny model matematyczny kabiny lakierniczej, omówiony wcześniej.

Wykorzystując elementy oprogramowania Simulink oraz funkcje wbudowane biblioteki *B&R Automation Studio Target for Simulink* [1] skonstruowano model matematyczny kabiny lakierniczej [7], przedstawiony na rys.6, na którego podstawie wygenerowano funkcję w języku ANSI C, którą następnie uruchomiono w sterowniku PLC2. Funkcje wbudowane obejmują bloki wejść i wyjść (B&R IN) oraz bloki parametryczne (B&R PARAMETER). Sposób generowania kodu w języku ANSI C określa blok B&R CONFIG.

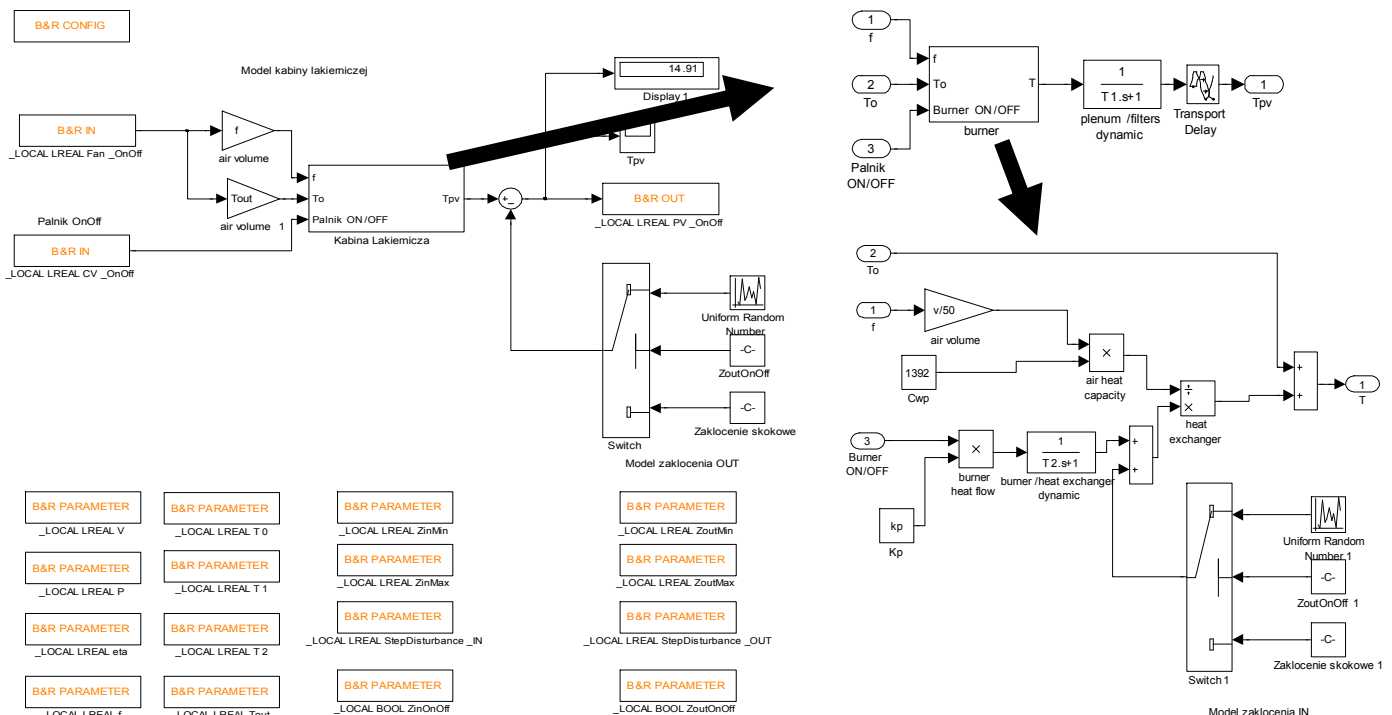
Model matematyczny kabiny lakierniczej uwzględnia dynamikę palnika, filtrów wraz z elementami konstrukcyjnymi kabiny [7] oraz możliwych zakłóceń działania palnika oraz zakłóceń pomiarowych. Założono zakłócenia o charakterze skokowym, jak również w postaci szumu o określonej amplitudzie.



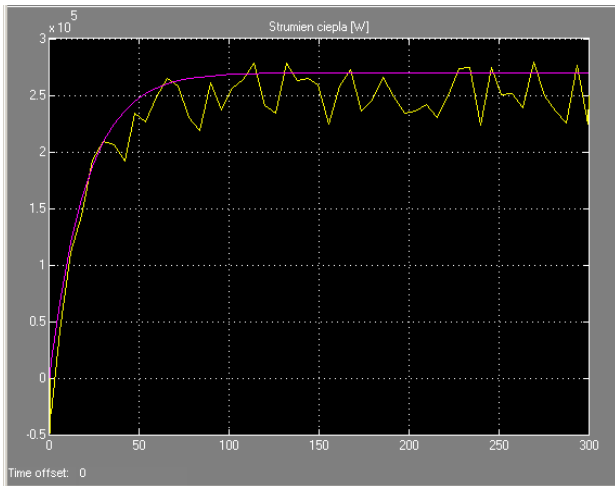
Rys. 5. Widok stanowiska badawczego, gdzie PLC1 (algorytm regulacji), PLC2 (model kabiny lakierniczej) [opracowanie własne].

3. BADANIA SYMULACYJNE

Dla przedstawionego powyżej modelu przeprowadzono kilka symulacji testowych. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki symulacji odpowiedzi na skok jednostkowy tj. sygnału załączenia palnika wysłanego z PLC1 do PLC2, który symuluje pracę wszystkich składowych elementów kabiny lakierniczej. Ponieważ nie możliwości sterowania wydajnością cieplną w palniku jednobiegowym, palnik pracuje pełną mocą. Wprowadzono zakłócenia pracy palnika przy użyciu losowych wartości jak na rysunku 6. Przebiegi na rysunku 7 przedstawiają odpowiedź kabiny wygenerowaną przez PLC2 symulującego pracę kabiny lakierniczej. Linia w kolorze żółtym reprezentuje zakłócony sygnał strumienia mocy cieplnej z palnika, natomiast linia fioletowa przedstawia sygnał idealny niezakłócony.



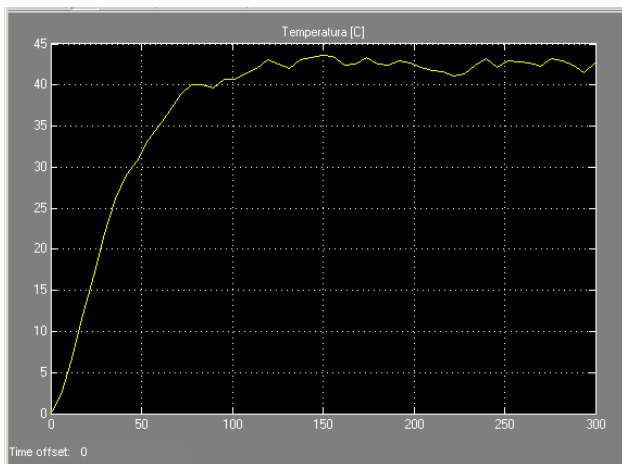
Rys. 6. Model matematyczny kabiny lakierniczej z funkcjami wbudowanymi w oprogramowaniu Simulink. [opracowanie własne]



Rys. 7. Odpowiedź na skok jednostkowy modelu symulacyjnego

go

Na rysunku 8 przedstawiono natomiast zmiany temperatury powietrza w przestrzeni roboczej kabiny lakierniczej. Przebieg uwzględnia zakłócenia pracy palnika.



Rys. 8. Temperatura powietrza w kabine lakierniczej

PODSUMOWANIE

Procedura hardware in the loop umożliwia bezpieczne testowanie układów regulacji w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, dzięki zastosowaniu docelowej platformy wykonawczej algorytmów sterowania, w tym przypadku sterownika PLC. Wykorzystanie takiego stanowiska symulacyjnego pozwala na testowanie poprawności założonej techniki regulacji i sterowania. W bezpieczny sposób oraz unikając kosztów zużycia energii szczególnie przy mocach grzewczych rzędu 300 kW można opracowywać i udoskonalać systemy regulacji.

BIBLIOGRAFIA

1. B&R Automation Runtime Target for Simulink Technical Manual TM140
2. Jaszczak S., Nikończuk P. Synthesis of spray booth control software in programmable controller, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 91 NR 11/2015:182-185
3. Jaszczak S., Nikończuk P., Temperature control algorithms for the refinishing spray booth, Measurement Automation and Monitoring (Pomiary Automatyka Kontrola) 7/2015: 358-360

4. Jaszczak S., Nikończuk P., A model of the refinishing spray booth as a plant of automatic control, Measurement Automation and Monitoring (Pomiary Automatyka Kontrola) 7/2015:361-363
5. Jaszczak S., Nikończuk P., A preliminary analysis of spray booth temperature control using PWM modulation with dynamic trigger period, Measurement Automation and Monitoring (Pomiary Automatyka Kontrola) 8/2016:361-363
6. Jaszczak S., Szybkie prototypowanie cyfrowych algorytmów sterowania z wykorzystaniem programu Simulink, Metody Informatyki Stosowanej, nr2/2009, s. 3;
7. Skruch P., Wprowadzenie do testowania układów automatyki, XI International PhD Workshop OWD 2009, s.132;
8. Nikończuk P., Uproszczony model kabiny lakierniczej w środowisku MATLAB/SIMULINK, AUTOBUSY, NR 6/2016, S. 150-1053

The Lab for Testing the Control Systems of Temperature Inside Refinishing Spray Booth Using Hardware In The Loop Mode

An important advantage of simulation in mode of hardware in the loop is the ability to test the real control system in the safe, real time environment. The model used for simulations includes all elements of control object. The paper presents an application of the method for refinishing spray booth. Article presents details of the lab structure, hardware integration and software implementation. The sample simulation results are also presented..

Autorzy:

dr inż. **Piotr Nikończuk** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, e-mail: Piotr.Nikonczuk@zut.edu.pl

dr inż. **Sławomir Jaszczak** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Informatyki, e-mail: sjaszczak@wi.zut.edu.pl