

KONCEPCJA MODELOWANIA DYNAMIKI KABINY LAKIERNICZEJ Z WYKORZYSTANIEM ALGORYTMÓW EWOLUCYJNYCH

Streszczenie

W artykule omówiony przedstawiono koncepcję liniowego modelu dynamiki kabiny lakierniczej jako obiektu sterowania temperaturą. W modelu poddano analizie elementy składowe oraz ich transmitancje. Transmitancja zastępcza elementów składowych stanowi obiekt automatycznej regulacji. Przedstawiono również koncepcję doboru współczynników równań modelu liniowego kabiny lakierniczej z wykorzystaniem algorytmów ewolucyjnych. Dla proponowanej metody w artykule przedstawiono wyniki oraz wnioski z przeprowadzonej wstępnej weryfikacji.

WSTĘP

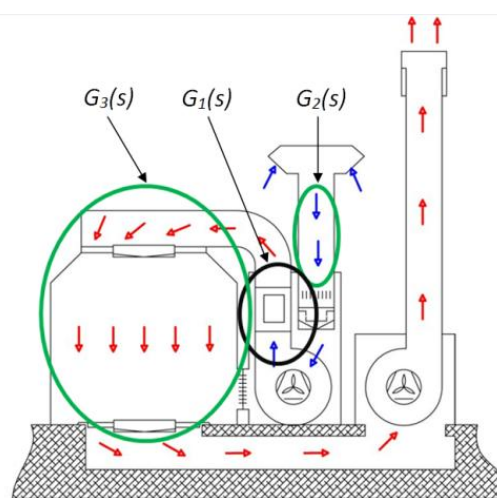
Podczas procesu lakierowania w przestrzeni roboczej kabiny lakierniczej powietrze jest stale wymieniane. Wymiana powietrza ma za celu zapewnienie bezpieczeństwa pracy lakiernika oraz wysoką jakość powłoki lakierniczej. Świeże powietrze jest oczyszczane poprzez filtr wstępny, następnie ogrzewane do zadanej temperatury oraz nawiewane poprzez filtr sufitowy do przestrzeni roboczej. Zabierane z przestrzeni roboczej powietrze zawierające cząstki lakieru oraz lotne związki organiczne jest oczyszczane z cząstek stałych lakieru i wyrzucane do atmosfery. Intensywność wymiany powietrza jest dość znaczna, zazwyczaj dla renowacyjnych kabiny lakierniczych strumień masy wymienianego powietrza waha się w przedziale 20 000 – 30 000 m³/h. Temperatura powietrza wewnątrz przestrzeni roboczej utrzymywana jest na poziomie temperatury pokojowej. Aby zapewnić utrzymanie temperatury na wspomnianym poziomie wymagane jest źródło ciepła do ogrzewania powietrza, zazwyczaj stosowane są instalacje wyposażone w palniki olejowe lub gazowe [4]. Moce palników wahają się w przedziale 200 kW do 300 kW.

W celu utrzymania temperatury wymienianego powietrza na zadanym poziomie z dopuszczalnymi zmianami, należy dobrać odpowiedni układ regulacji. Aby jednak przeprowadzić prace nad doбором postaci regulatora, należy uprzednio zidentyfikować dynamikę obiektu. Zazwyczaj dąży się do utworzenia liniowego modelu obiektu regulacji. Dysponując liniowym modelem dynamiki kabiny lakierniczej jako obiektu sterowania temperaturą można przeprowadzić proces doboru odpowiedniego układu regulacji. Przy doborze można rozpatrzyć wybrane postaci regulatorów. Dla dobranych postaci oraz nastaw regulatorów można przeprowadzić symulacje numeryczne, co pozwoli na wstępną weryfikację jakości sterowania. Obiegi powietrza wewnątrz kabiny lakierniczej w trybach pracy lakierowania i suszenia są zróżnicowane co wpływa na zmianę dynamiki kabiny jako obiektu sterowania temperaturą. W dalszych rozważaniach rozpatrywany jest model transmitancji liniowej dla kabiny lakierniczej pracującej w trybie lakierowania.

1. MODEL DYNAMIKI STEROWANIA TEMPERATURĄ W TRYBIE PRACY LAKIEROWANIA

Podczas tworzenia liniowego modelu kabiny lakierniczej jako obiektu sterowania temperaturą wyróżniono trzy składowe transmitancje. Elementy składowe stanowią: transmitancja systemu ogrzewania powietrza $G_1(s)$, transmitancja masy powietrza $G_2(s)$, transmitancja elementów konstrukcyjnych kabiny lakierniczej $G_3(s)$. Na

rysunku 1 przedstawiono poszczególne elementy transmitancji kabiny lakierniczej.



Rys. 1 Składowe transmitancji kabiny lakierniczej w trybie lakierowania

Transmitancja systemu ogrzewania powietrza $G_1(s)$ obejmuje dynamikę źródła ciepła oraz wymiennika ciepła. Najczęściej źródło ciepła stanowi palnik olejowy lub gazowy [6]. Transmitancja układu ogrzewania powietrza została określona jako element inercyjny pierwszego rzędu i przyjmuje następującą postać:

$$G_1(s) = \frac{P\eta}{1 + sT_B} \quad (1)$$

gdzie:

P – moc palnika [W],

η – sprawność palnika,

T_B – stała czasowa inercji wymiennika ciepła.

Transmitancja masy powietrza $G_2(s)$ związana jest z właściwościami powietrza i w modelu liniowym można traktować ją jako element proporcjonalny. Wzmocnienie elementu proporcjonalnego można przedstawić w następującej postaci:

$$G_2(s) = \frac{1}{Vc_p} \quad (2)$$

gdzie:

V – masa powietrza [m³/s],

c_p - Ciepło właściwe [kJ/(kg K)],

Transmitancja elementów konstrukcyjnych kabiny lakierniczej $G_3(s)$ związana jest bezwładnością cieplną elementów kanałów wentylacyjnych, filtrów oraz innych elementów instalacji wentylacyjnej. W modelu liniowym pominięto straty ciepła związane z przenikaniem ciepła przez ścianki wszystkich elementów instalacji wentylacyjnej. W związku z tym transmitancja liniowego modelu przyjmuje postać elementu inercyjnego pierwszego stopnia ze wzmocnieniem równym jeden:

$$G_3(s) = \frac{1}{1 + sT_{SC}} \quad (3)$$

gdzie:

T_{SC} – stała czasowa inercji elementów konstrukcyjnych.

Schemat blokowy połączenia składowych transmitancji modelu liniowego kabiny lakierniczej przedstawiono na rysunku 2. Poszczególne oznaczenia na rysunku 2 oznaczają:

Q – ciepło dostarczane z palnika do ogrzania powietrza,

t_B – wzrost temperatury powietrza [C],

t_o – temperatura powietrza świeżego [C],

t_k – temperatura powietrza dostarczonego do przestrzeni roboczej kabiny lakierniczej [C].

Transmitancja zastępcza dla połączenia elementów składowych przedstawionych na rysunku 2 przyjmuje następującą postać:

$$G(s) = (G_1(s)G_2(s) + t_o)G_3(s) \quad (4)$$

Po podstawieniu równań składowych transmitancja liniowego modelu kabiny lakierniczej przyjmuje następującą postać:

$$G(s) = \left(\frac{\frac{P\eta}{Vc_p}}{1 + sT_B} + t_o \right) \frac{1}{1 + sT_{SC}} \quad (5)$$

2. KONCEPCJA IDENTYFIKACJI TRANSMITANCJI KABINY LAKIERNICZEJ Z WYKORZYSTANIEM ALGORYTMÓW EWOLUCYJNYCH

Istnieje wiele metod identyfikacji i linearyzacji modeli dynamiki obiektów sterowania [2,3,9]. W celu identyfikacji współczynników transmitancji liniowego modelu kabiny lakierniczej jako obiektu sterowania temperaturą podjęto próbę wykorzystania algorytmów ewolucyjnych.

Założenie metody opiera się na poszukiwaniu współczynników równania transmitancji liniowego modelu (5). Jako poszukiwane parametry przyjęto trzy wartości: sprawność wymiennika ciepła η , stała czasowa inercji palnika T_B oraz stała czasowa inercji elementów konstrukcyjnych kabiny lakierniczej T_{SC} . Pozostałe elementy równania: moc palnika P , masa powietrza V , oraz ciepło właściwe powietrza są wartościami znanymi.

Dla procesu optymalizacji z wykorzystaniem algorytmów ewolucyjnych należy określić funkcję celu, dla której poszukujemy optimum. Dla omawianego przypadku, w procesie poszukiwania wspomnianych parametrów przyjęto minimalizację następującej funkcji celu f_T :

$$f_T = \sum_n \frac{|\delta_i|}{n} \rightarrow \min \quad (6)$$

gdzie:

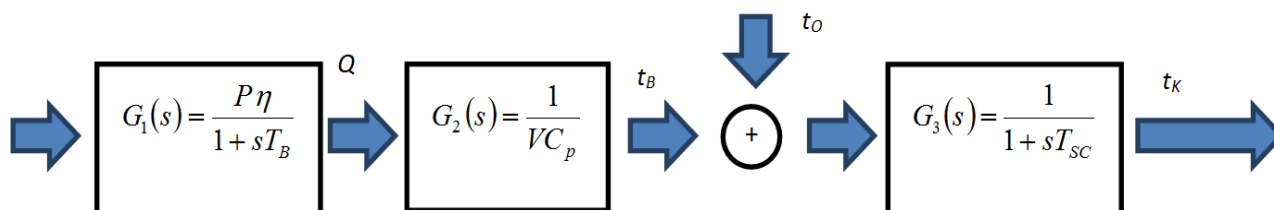
f_T – funkcja celu,

δ_i – błąd odwzorowania w i -tym punkcie,

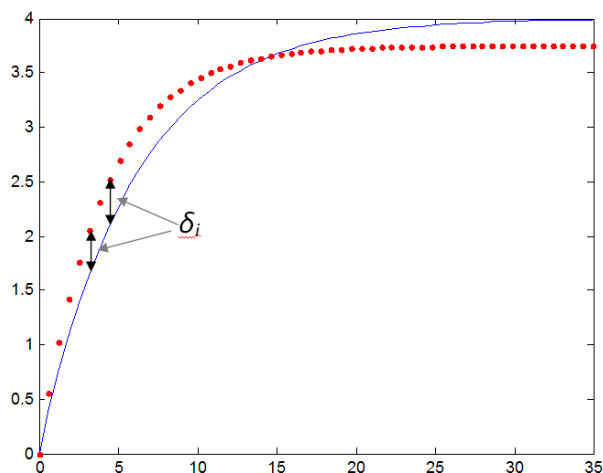
n – ilość punktów badania błędu odwzorowania.

Poszukiwanie najlepszego rozwiązania polega na tym, aby znaleźć takie współczynniki równania, dla których wartość bezwzględna średniego błędu odwzorowania osiągnie minimum. Błędy odwzorowania są to różnice wartości pomiędzy odpowiedzią na skok jednostkowy modelu liniowego oraz rzeczywistej kabiny lakierniczej. Błędy odwzorowania dla poszczególnych punktów przedstawia rysunek 3. Jako skok jednostkowy w tym przypadku przyjmuje się sygnał załączenia palnika.

W przypadku idealnego modelu odpowiedzi skokowe dla obiektu rzeczywistego oraz jego liniowego modelu powinny się pokrywać. Średni błąd odwzorowania wtedy przyjmuje wartość zero. W związku z powyższym podczas procesu optymalizacji poszukuje się współczynników, dla których średni błąd odwzorowania będzie dążył do zera.



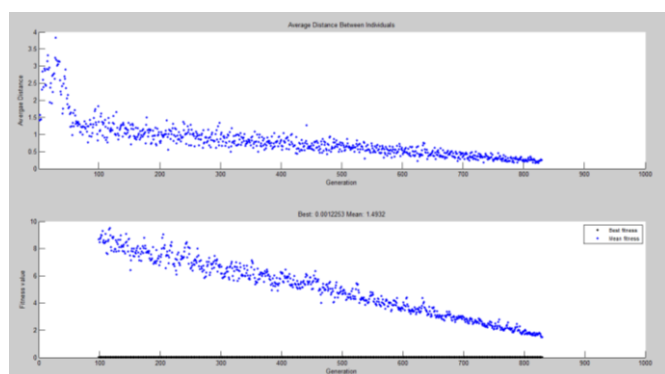
Rys. 2 Schemat blokowy liniowego modelu kabiny lakierniczej w trybie lakierowania



Rys. 3 Błędy odwzorowania pomiędzy obiektem rzeczywistym a modelem liniowym

3. WSTĘPNA WERYFIKACJA MECHANIZMU IDENTYFIKACJI

Dla zaproponowanej metody przeprowadzono wstępną weryfikację z wykorzystaniem środowiska MATLAB. Utworzono hipotetyczną kabinę lakierniczą dla której przyjęto sprawność wymiennika 0,9 oraz stałą czasową dla palnika $T_B = 20s$ oraz stałą czasową elementów konstrukcyjnych $T_{SC} = 20s$. Dla takiego obiektu przeprowadzono obliczenia z wykorzystaniem toolbox'u GATOOL. Rysunek 4 przedstawia wartości średniego dopasowania oraz najlepszego osobnika dla poszczególnych iteracji w procesie optymalizacji.



Rys. 4 Proces optymalizacji z wykorzystaniem algorytmów genetycznych

Z przedstawionych na rysunku 4 wyników obliczeń wynika iż w kolejnych iteracjach średnie dopasowanie populacji dążyło w kierunku osobnika najlepszego. W związku z powyższym wartości poszczególnych osobników zbiegały się do wartości optymalnej. Otrzymane wyniki obliczeń wyniosły:

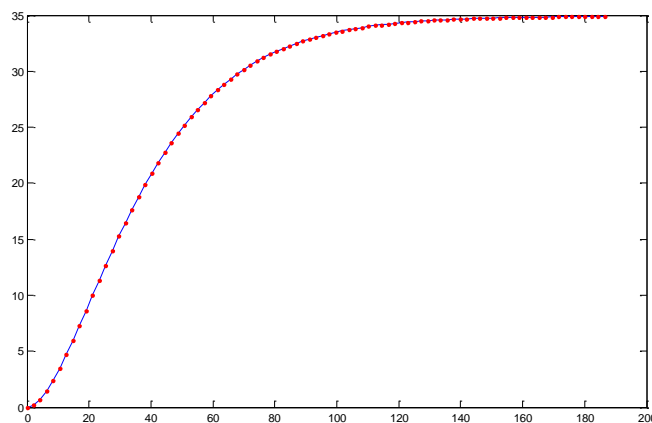
$$T_B = 19,9934697322951;$$

$$T_{SC} = 20,0028557680158;$$

$$\eta = 0,899944836177417.$$

Wyniki te są bardzo bliskie wartości założonych dla hipotetycznej kabiny lakierniczej.

Na rysunku 5 przedstawiono odpowiedzi na skok jednostkowy dla hipotetycznej kabiny lakierniczej oraz uzyskanego jej modelu liniowego. Obydwa przebiegi się pokrywają a więc a uzyskane wartości.



Rys. 5 Odpowiedź na skok jednostkowy obiektu oraz otrzymanego modelu liniowego.

PODSUMOWANIE

Prezentowany model kabiny lakierniczej jako obiektu sterowania temperaturą uwzględnia trzy elementy składowe. Podział taki uwzględnia dynamikę zespołu ogrzewającego powietrze, oraz dynamikę zmian temperatury elementów konstrukcyjnych instalacji wentylacyjnej. Uwzględniono również masę wymienianego powietrza co wiąże się z zapotrzebowaniem mocy na ogrzanie powietrza do zadanej temperatury.

Istnieje wiele zastosowań metod sztucznej inteligencji w układach automatyki [2,4,9]. Proponowana metoda poszukiwania transmitancji liniowego modelu kabiny lakierniczej zakłada wykorzystanie algorytmów ewolucyjnych. Ogólnie wiadomo, że algorytmy ewolucyjne nie gwarantują nam uzyskania najlepszego wyniku. Dają jednak możliwość znalezienia rozwiązań bliskich optimum. Istnieje wiele innych metod i narzędzi numerycznych pozwalających na tworzenie liniowych modeli, które wystarczająco wiernie odtwarzają dynamikę badanych obiektów. Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, że liniowe modele uzyskiwane wszelkimi metodami są również obarczone błędami. Błędy mogą wynikać z różnych powodów, między innymi z nieliniowości obiektów rzeczywistych. Biorąc pod uwagę przedstawione wyniki obliczeń dla hipotetycznej kabiny lakierniczej wynika iż istnieje możliwość uzyskania modelu liniowego z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych. Powyższy model odwzorowuje badany obiekt w zadowalającym stopniu. Można oczekiwać że wartość średniego błędu bezwzględnego dla odwzorowania będzie porównywalna z błędami odwzorowania dla modeli liniowych uzyskiwanych innymi znanymi metodami.

Przy współczesnym stanie techniki istnieje możliwość implementacji metody identyfikacji dynamiki w sterownikach programowalnych PLC [1]. Narzędzia programistyczne dla sterowników PLC pozwalają również wykorzystywanie algorytmów ewolucyjnych. Autoidentyfikacja dynamiki przez kabinę lakierniczą wyposażoną w sterownik PLC pozwoli na możliwości autostrajania regulatora temperatury w przypadku zmian dynamiki kabiny. Dynamika kabiny lakierniczej może ulegać zmianie z różnych powodów, między innymi zanieczyszczenia filtrów. Wzrost zanieczyszczenia filtrów powoduje opory przepływu powietrza, a to skutkuje zmniejszeniem masy powietrza do ogrzewania.

Prezentowany model dynamiki kabiny lakierniczej nie uwzględnia instalacji odzysku ciepła w postaci rekuperatorów. Na rynku istnieje kilka rozwiązań odzysku ciepła. Dla renowacyjnych kabin lakierniczych najbardziej popularne są rekuperatory krzyżowe [5,7]. Instalacja odzysku ciepła całkowicie zmienia dynamikę kabiny lakierniczej jako obiektu sterowania temperaturą. Autorzy planują

dalsze prace nad modelem liniowym dynamiki kabiny lakierniczej, uwzględniającym instalację odzysku ciepła. W modelu planuje się również uwzględnić spadek sprawności odzysku ciepła spowodowany osadami cząstek stałych mgły lakierniczej [5,7,8]. Model taki pozwoli na opracowanie i wstępne weryfikacje numeryczne optymalnego układu sterowania temperaturą. Planuje się rozważenie układu regulacji opartego o sterowanie odporne, z doбором parametrów regulatora z wykorzystaniem algorytmów ewolucyjnych [4].

BIBLIOGRAFIA

1. Jaszczak S., Nikończuk P., Synthesis of spray booth control software in programmable controller, Przegląd Elektrotechniczny 11/2015(1):182-185, doi:10.15199/48.2015.11.44
2. Jaszczak S., Pluciński M., Piegat A., Neuronowy model ruchu obrotowego pojazdu podwodnego w płaszczyźnie poziomej, IX Sympozjum Symulacja Procesów Dynamicznych, Warszawa 1996,
3. Jaszczak S., Pluciński M., Piegat A., Identyfikacja parametrów nieliniowego napędu systemu dynamicznego, Konferencja Naukowo-Techniczna Współczesne Problemy w Budowie i Eksploatacji Maszyn, Szczecin 1996
4. Nikończuk P., Evolutionary algorithms application for optimal controller design, Polish Journal of Environmental Studies, 2008, Vol. 17(4C):88-90
5. Nikończuk P., Odzysk ciepła w kabinach lakierniczych, Auto Moto Serwis, 9/2011:40-43
6. Nikończuk P., Sposoby ogrzewania powietrza w kabinach lakierniczych, Auto Moto Serwis 4/2012:44-45
7. Nikończuk P., Study of Heat Recovery in Spray Booths, Metal Finishing Vol. 111 (6): 37-39,
8. Nikończuk P., Preliminary analysis of heat recovery efficiency decrease in paint spray booths, Transactions of the Institute of Metal Finishing 2014 VOL 92(5): 235-237
9. Rojek R., Bartecki K., Korniak J., Metody sztucznej inteligencji w zastosowaniach automatyki, Pomiar Automatyka Kontrola, 10/2006: 29-34,

A CONCEPT OF SPRAY BOOTH' DYNAMIC MODELLING USING THE EVOLUTIONARY ALGORITHMS

Abstract

Paper presents the concept of linear model of spray booth. The numerical model describes the dynamic of temperature automatic control. At the model transfer functions of component elements are discussed. Parameters of dynamic model are selected using evolutionary algorithms. The paper presents also results and discussion of preliminary numerical verification of the method.

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: slawomir.jaszczak@zut.edu.pl