

UKŁAD REGULACJI Z MODELEM WEWNĘTRZNYM STERUJĄCY OBIEKTEM NIELINIOWYM

Krzysztof KULA¹, Karol POZORSKI²

1. Akademia Morska w Gdyni, ul.Morska 81-87, 81-225 Gdynia,
tel: 58 690 14 94 fax:58 690 14 71 e-mail: kskula@am.gdynia.pl
2. Lamel Rozdzielnice Sp. z o.o. Pępowo ul. Gdańska 3, 83-330 Żukowo
tel: 58 685 40 50 fax 58 685 40 50 e-mail pozorski.lamel@gmail.com

Streszczenie: W pracy przedstawiono koncepcję układu sterowania obiektem nieliniowym, jakim jest system wentylacji klatki schodowej, stanowiącej drogę ewakuacji na wypadek pożaru budynku wielopiętrowego. Opiera się ona na zastosowaniu modelu nieliniowego oraz jego inwersji przy wykorzystaniu techniki sprzężenia zwrotnego. Dzięki wprowadzeniu do struktury regulatora modelu obiektu układ adoptuje się do zmiennych warunków pracy.

1. WPROWADZENIE

Koncepcję układu sterowania IMC, w którym model obiektu regulacji włączany jest do struktury regulatora, przedstawili w 1989 roku Morari i Zafiriou [1]. Struktura ta umożliwia na podstawie przebiegu przeszłych sygnałów wejściowych i aktualnego stanu obiektu prognozowanie zmian wielkości regulowanej w przyszłości. Dzięki temu możliwa jest kompensacja wpływu niewielkich nieliniowości a także zakłóceń, zanim ich skutki ujawnią się na wyjściu układu.

Przy syntezie regulatora wykorzystywany jest model odwrotny obiektu. Gdy w obiekcie występują znaczące opóźnienia lub niestabilne zera utworzenie modelu odwrotnego wymaga dokonania pewnych uproszczeń. Nie inaczej jest przy występowaniu nieliniowości i zmieniającym się punkcie pracy. A obiektem tego typu jest rozpatrywany system zapobiegania nadmiernemu zadymieniu.

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Jednym z wymagań dotyczących zabezpieczenia przeciwpożarowego budynków użyteczności publicznej jest zapewnienia należytej ochrony dróg ewakuacyjnych. W budynkach wielokondygnacyjnych musi być wyodrębniona klatka schodowa, która na każdym piętrze wyposażona jest w zamykane automatycznie drzwi. Ich obecność ma ograniczyć przenikanie dymu z pomieszczeń objętych pożarem. Aby klatka schodowa mogła lepiej pełnić funkcję bezpiecznej drogi ewakuacyjnej, powinna być wypełniona powietrzem o ciśnieniu wyższym niż pozostałe pomieszczenia o 50 ± 10 Pa, co powinno

zapobiec jej nadmiernemu zadymieniu. W sytuacji, gdy otwarte zostaną jakieś drzwi chronionego pomieszczenia, nadciśnienie zanika na skutek wyrównania ciśnień z sąsiednim pomieszczeniem lub bezpośrednio z ciśnieniem atmosferycznym.

Gdy wszystkie drzwi zostaną ponownie zamknięte, w pomieszczeniu chronionym ciśnienie powinno wzrosnąć do wartości min 40 Pa w czasie krótszym niż 3 sekundy.

Wprawdzie w tym przypadku mamy do czynienia z regulacją stałowartościową, to jednak punkt pracy, z powodu zmieniającej się nie szczelności pomieszczenia chronionego, może zmieniać się w szerokich granicach. W skrajnym przypadku, gdy strumień powietrza tłoczonego przez wentylator jest mniejszy od występujących przecieków, urządzenia wykonawcze pracować będą w stanie nasycenia. Problemem sterowania obiektami tego typu zajmowali się m.in. Zapała i Szumski [2] implementując do tego celu algorytm regulacji predykcyjnej oraz Wiche, i Majdański [3], którzy zastosowali regulację adaptacyjną wykorzystującą na potrzeby mechanizmu dopasowującego regulator do zmieniających się warunków pracy- sieć neuronową.

3. OBIEKT REGULACJI

Obiektem regulacji jest model fizyczny pomieszczenia ewakuacyjnego wraz z pomieszczeniem sąsiadującym o wymiarach ok. 6 x 6 x 3 m. Powietrze do tego pomieszczenia dostarczane jest kanałem doprowadzającym przez wentylator zasilany z falownika.

3.1. Identyfikacja obiektu

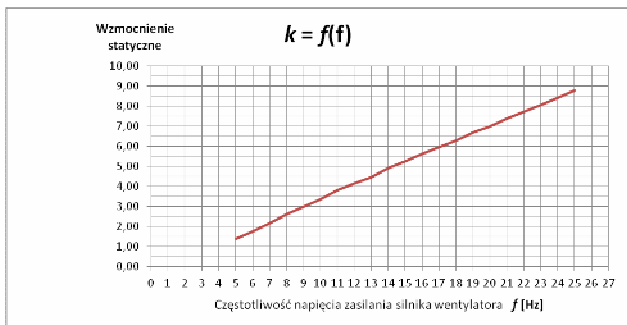
Na podstawie eksperymentów identyfikacyjnych utworzony został model matematyczny obiektu rozumiany jako zależność między ciśnieniem w pomieszczeniu chronionym a częstotliwością zasilania wentylatora. Zlinearyzowany model obiektu przedstawić można przy pomocy następującej transmitancji

$$M(s) = \frac{ke^{-T_0s}}{T^2s^2 + 2\xi Ts + 1} \quad (1)$$

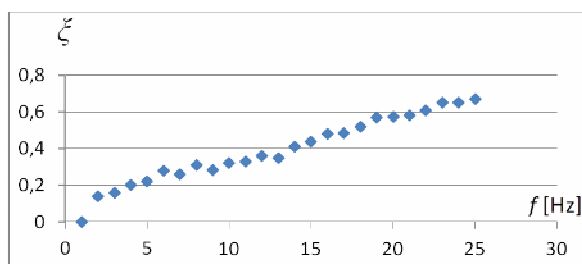
gdzie: k - wzmocnienie statyczne
 T - okres drgań własnych ,

ξ - bezwymiarowy współczynnik tłumienia

Parametry tego modelu k, ξ zmieniają się jednak wraz ze zmianą częstotliwości napięcia zasilania wentylatora, co zobrazowane zostało na rysunkach 1,2.



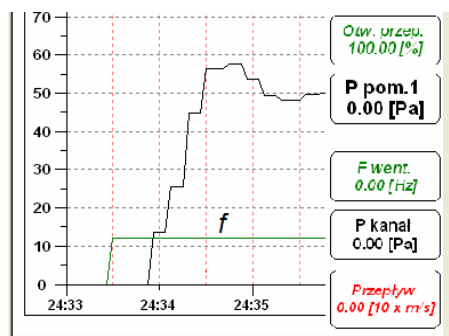
Rys.1 Wzmocnienie obiektu w funkcji częstotliwości napięcia zasilania



Rys.2 Bezwymiarowy współczynnik tłumienia ζ w funkcji częstotliwości napięcia zasilania

Urządzeniem wykonawczym jest wentylator, na którego silnik podawane jest z falownika napięcie przemiennie o stałej amplitudzie i zmiennej częstotliwości wyznaczanej przez sygnał z regulatora w zakresie od 0 do 25 Hz. Umożliwia to precyzyjne sterowanie prędkością obrotową silnika, czyli wydatkiem wentylatora.

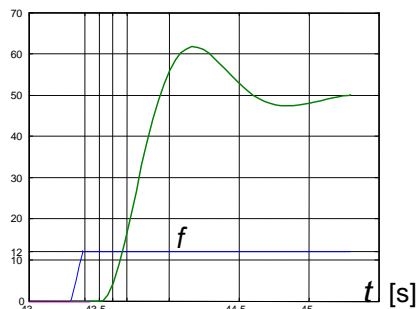
W testowanych warunkach przy wyjściowej nieszczelności pomieszczenia do osiągnięcia zadanego nadciśnienia 50 Pa wentylator był zasilany napięciem o częstotliwości 12 Hz. Obrazuje to przebieg zmian ciśnienia zamieszczony na rysunku 3.



Rys.3 Charakterystyki skokowa obiektu przy częstotliwości zasilania $f=12$ Hz.

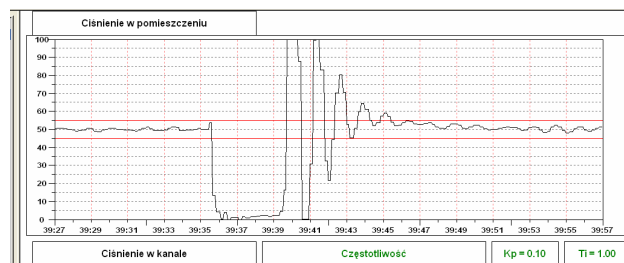
Model liniowy w tym punkcie pracy opisuje transmitancja

$$M(s) = \frac{4.17}{0.03598s^2 + 0.1631s + 1} e^{-0.16s} \quad (2)$$



Rys.4 Charakterystyka skokowa modelu matematycznego przy częstotliwości zasilania $f=12$ Hz.

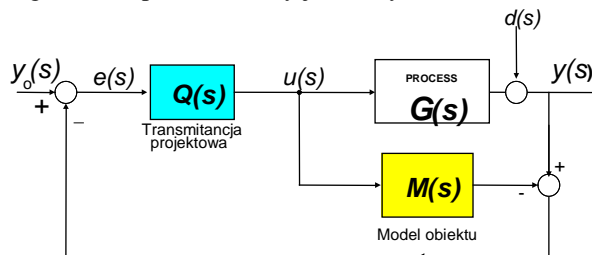
Sterowanie obiektem nieliniowym przy pomocy regulatora PID o stałych nastawach, gdy punkt pracy może się zmieniać w szerokim przedziale, nie jest w stanie zapewnić zadawalającej jakości. Przykładowe przebiegi wielkości regulowanej przy zastosowaniu regulatora PID osiągnięte na modelu fizycznym przedstawione zostały na rysunku 5.



Rys.5 Zmiany nadciśnienia uzyskane w wyniku sterowania przy pomocy regulatora PID

4. UKŁAD REGULACJI

Na potrzeby sterowania tym obiektem zastosowany został układ regulacji z modelem wewnętrznym. Poglądowy schemat tego układu przedstawiony jest na rysunku 6.



Rys.6 Schemat blokowy układu regulacji z modelem wewnętrznym

Transmitancję projektową $Q(s)$ wyznaczyć można z zależności

$$Q(s) = F(s) \cdot M_{odw}(s) \quad (3)$$

gdzie M_{odw} – transmitancja modelu odwrotnego obiektu
 $F(s)$ – transmitancja filtra pozwalająca spełnić warunek, by $Q(s)$ była transmitancją właściwą

$$F(s) = \frac{1}{(1 + \beta s)^n} \quad (4)$$

gdzie: n - rząd filtru, β - dobieralny parametr -stała czasowa filtru

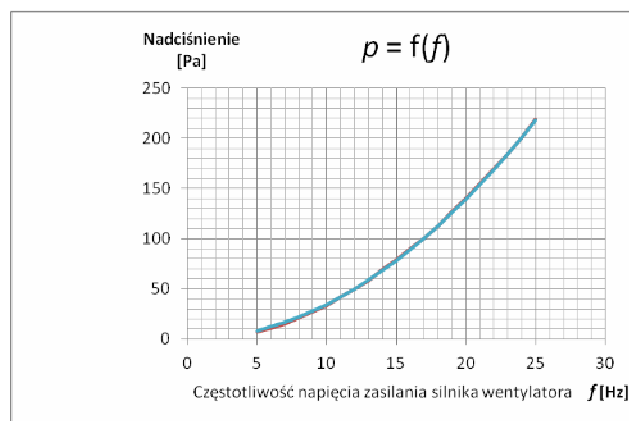
Gdy obiekt jest silnie nieliniowy lub w transmitancji modelu występują zera w prawej półpłaszczyźnie ewentualnie znaczne opóźnienia to skonstruowanie modelu odwrotnego wymaga zastosowania specjalnych technik. Ponieważ w rozpatrywanym obiekcie występuje jedynie niewielkie opóźnienie a model nie zawiera niestabilnych zer, główną trudność przy implementacji regulatora IMC stanowią nieliniowości.

4.1. Projektowanie struktury IMC z wykorzystaniem techniki inwersji przy pomocy sprzężenia zwrotnego.

Sygnal sterujący podawany na obiekt i jego model o nieliniowej charakterystyce statycznej zamieszczonej na rysunku 7 wyznaczany jest na podstawie zależności

$$u(s) = Q(s) \cdot e(s) \quad (5)$$

gdzie $e(s)$ oznacza transformatę Laplace'a uchybu regulacji a $Q(s)$ stanowi stabilną transmitancję operatorową o równej liczbie biegunów i zer, cechowaną niezerową i skończoną odpowiedzią dla sygnałów wysokiej częstotliwości.



Rys.7 Charakterystyka statyczna obiektu wraz z urządzeniem wykonawczym

Oznaczmy transmitancję odwrotną do transmitancji projektowej jako

$$P(s) = Q^{-1}(s) = \frac{e(s)}{u(s)} \quad (6)$$

a następnie rozłożmy na część stałą p_0 oraz na transmitancję ściśle właściwą $\bar{P}(s)$ [4]

$$P(s) = p_0 + \bar{P}(s) \quad (7)$$

gdzie: $p_0 = \frac{I}{\lim_{s \rightarrow \infty} Q(s)}$

Przekształcając (5) otrzymamy:

$$e(s) = Q^{-1}(s) \cdot u(s) \quad (8)$$

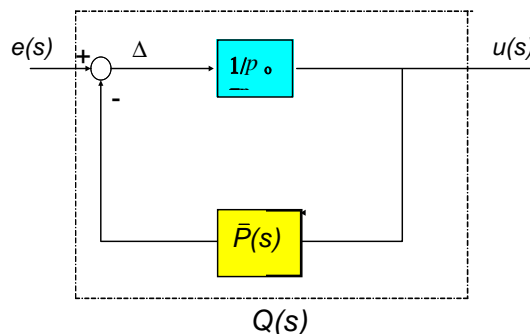
Transformata uchybu po uwzględnieniu (6) i (7) będzie równa

$$e(s) = [p_0 + \bar{P}(s)] \cdot u(s) \quad (9)$$

Po dokonaniu przekształceń dochodzimy do zależności:

$$u(s) = \frac{I/p_0}{I + \frac{1}{P(s)}} \cdot e(s) \quad (10)$$

Równanie to opisuje pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego



Rys.8 Przedstawienie transmitancji projektowej z wykorzystaniem sprzężenia zwrotnego i transmitancji ściśle właściwej $\bar{P}(s)$.

Odwrotną transmitancję projektową (6) po uwzględnieniu (3) przedstawić można jako:

$$P(s) = F^{-1}(s) \cdot (M_{odw})^{-1} \quad (11)$$

Jeżeli model jest członem minimalnofazowym, zależność tę można uprościć do postaci

$$P(s) = F^{-1}(s) \cdot M(s) \quad (12)$$

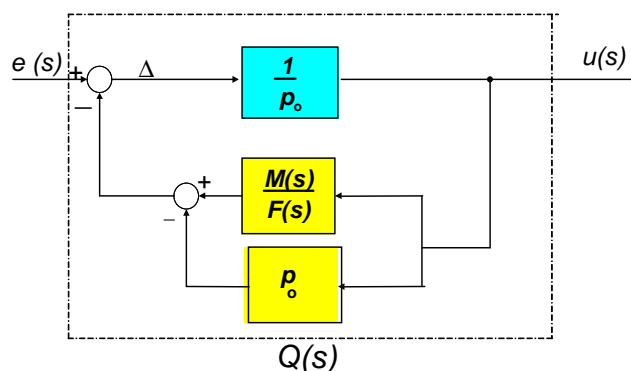
Zgodnie z (7) transmitancja ściśle właściwa $\bar{P}(s)$ jest równa różnicy odwrotnej transmitancji projektowej oraz części stałej

$$\bar{P}(s) = P(s) - p_0 \quad (13)$$

Po uwzględnieniu (11) zależność ta przyjmie postać:

$$\bar{P}(s) = \frac{M(s)}{F(s)} - p_0 \quad (14)$$

a schemat układu modelującego transmitancję projektową z rysunku 8 może być rozbudowany o dodatkową gałąź sprzężenia zwrotnego, co ukazuje rysunek 9.



Rys. 9 Schemat blokowy transmitancji projektowej.

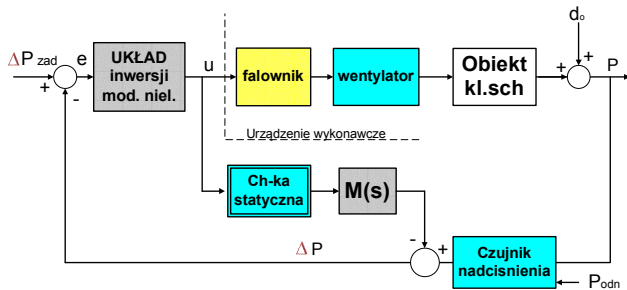
Podobną strukturę zastosowano w proponowanym układzie regulacji z tym, że w modelu odwrotnym uwzględniono

zmienne wzmocnienie statyczne (rys.1) oraz pominięto minimalne opóźnienie.

Sygnał Δ będzie tym samym równy:

$$\Delta = e(s) - k(f) \cdot \frac{\beta^2 s^2 + 2\beta s + 1}{T^2 s^2 + 2\zeta T s + 1} + p_0 \quad (15)$$

Schemat układu regulacji przedstawiony został na rysunku 10.

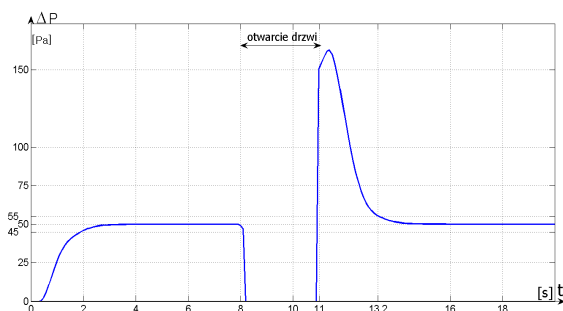


Rys.10 Schemat układu regulacji nadciśnienia z nieliniowym modelem wewnętrznym.

5. WYNIKI SYMULACJI

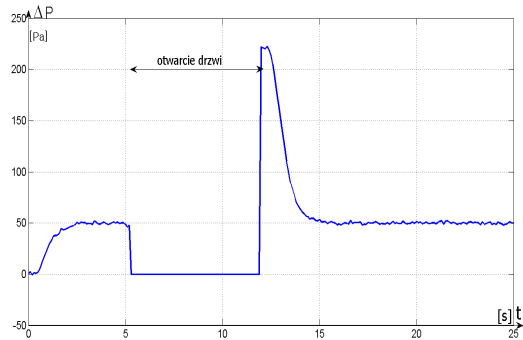
5.1 Parametry regulatora IMC.

Stałą czasową filtra oszacowano na podstawie zależności $\beta < (t_r - T_0)/5,83$, w której t_r to oczekiwany czas regulacji dla układu drugiego rzędu z czasem opóźnienia T_0 przy 2% szerokości pasma tolerancji. Dla dopuszczalnej wartości $t_r = 3$ s przy $n=2$ stała filtra musi spełniać warunek $\beta < 0,4528$. Przyjęto wartość $\beta = 0,4$. Parametr p_0 przybiera wartość 18,5. Symulację komputerową pracy układu regulacji przeprowadzono w środowisku Matlab-Simulink uwzględniając w obiekcie zależność z rysunku 2. Na rysunkach 11 i 12 przedstawione zostały symulacje zmian nadciśnienia przy



Rys. 11 Zmiany nadciśnienia w pomieszczeniu chronionym po uruchomieniu układu. Czas otwarcia drzwi – 3 s

uruchomieniu układu oraz w przypadku, gdy po otwarciu drzwi następuje wzrost prędkości obrotowej silnika wentylatora a tym samym wzrost ciśnienia w kanale doprowadzającym. Jednak zarówno, gdy przerwa trwa tylko 3 sekundy czy choćby dwa razy dłużej, powstałe nadciśnienie zostaje sprowadzone bez przeregulowania poniżej określonej przez normy wartości 60 Pa w czasie krótszym od 3 sekund.



Rys.12 Zmiany nadciśnienia w pomieszczeniu chronionym przy 6-sekundowym czasie otwarcia drzwi

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w pracy koncepcja wykorzystania regulatora IMC do sterowania obiektem nieliniowym bazuje na wykorzystaniu sprzężenia zwrotnego do utworzenia modelu odwrotnego obiektu. Dzięki niej można uzyskać odwrotny model nieliniowy obiektu, co przy zachowaniu odpowiedniej jakości sterowania w szerokim zakresie zmian wielkości sterującej. Przedstawiona metoda sterowania może być stosowana w układach silnie nieliniowych o zmiennym punkcie pracy, jak na przykład w testowanym układzie regulacji nadciśnienia, o ile zapewni się odpowiednią dokładność modelu.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Morari M., Zafiriou E., Robust process control, Englewood Cliffs, NJ Prentice Hall, 1989 ISBN-13: 978-0137821532
2. Zapała R., Szumski M., Kalibracja instalacji różnicowania ciśnienia, Chłodnictwo & klimatyzacja nr 3 2012 s.38-40
3. Wiche J., Majdański A., Pierwsze na świecie urządzenie wentylacyjne służące bezpieczeństwu ludzi z wykorzystaniem sztucznej inteligencji, Chłodnictwo & klimatyzacja nr 3 2012 s.42-44
4. Ching-Y. T, An Internal Model Control Approach to the Design of Yaw-Rate-Control Ship-Steering Autopilot, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.24,No4, October 1999 s.507-513

CONTROL SYSTEM WITH INTERNAL MODEL REGULATING A NONLINEAR PLANT

Key-words: IMC, nonlinear control

Abstract: The paper presents the concept of a nonlinear control system, which is the stairwell ventilation system, which is a means of escape in case of fire multi-storey building. It is based on the use of non-linear model and its inversion using feedback techniques. With the introduction the model to the structure of the controller system adapts to changing conditions.