

## UKŁAD IDENTYFIKACJI ON-LINE SUBOPTYMALNEGO MODELU LINIOWEGO OBIEKTU REGULACJI

Krzysztof KULA

Uniwersytet Morski w Gdyni  
tel.: 58 5586 494 e-mail: k.kula@we.umg.edu.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono koncepcję przeprowadzania przez układ sterowania nadrzędnego okresowej identyfikacji w trybie on-line obiektów, którymi sterują regulatory bezpośredniego działania, pracujące w autonomicznych pętlach nadzorowanych przez ten system. Celem tej identyfikacji jest zautomatyzowane utworzenie jak najlepszego, w sensie przyjętego kryterium, modelu obiektu, o którym nie jest wymagana żadna wiedza a priori, a następnie, w oparciu o ten model, przestrojenie stosownego regulatora lub włączenie go w strukturę nadzorowanego układu regulacji. Przy konstruowaniu modeli przeprowadzono analizę kształtu odpowiedzi obiektu, a do wyznaczenia ich parametrów zastosowana została metoda Åströma-Hägglunda. W pracy przedstawiono krótki opis przeprowadzanych pomiarów oraz zależności służące do obliczenia wymaganych parametrów różnych modeli. Przeprowadzono badania symulacyjne procesu identyfikacji, a ich wyniki w formie tabeli dołączono do artykułu.

**Słowa kluczowe:** automatyczne dostrajanie, cykle graniczne, identyfikacja modeli, próba przekąźnikowa.

### 1. WPROWADZENIE

Od czasu przedstawienia przez Åströma i Hägglunda w 1984 roku koncepcji wyznaczania parametrów cyklu granicznego przy zastosowaniu idealnego elementu dwupołożeniowego [1] i wykorzystania ich do bezpośredniego dostrojenia regulatorów [10], opracowane zostały nowe metody tworzenia modeli transmitancyjnych obiektów [3,11,12] a także sposoby zwiększenia dokładności pomiarów tych parametrów [13]. Jej obszar zastosowań rozszerzony został o możliwość identyfikacji w trybie on-line dynamiki całej pętli układu zamkniętego [2], co pozwoliło na zachowanie ciągłości kompensacji zakłóceń w czasie trwania próby przekąźnikowej. Nowe podejście w wykorzystaniu metody przekąźnikowej do identyfikacji zaprezentowali Panda i Yu, którzy w oparciu o matematyczny opis odpowiedzi na okresowy, prostokątny sygnał wymuszający przedstawili zależności, umożliwiające na podstawie przebiegu oscylacji wyznaczenie parametrów założonej transmitancji modelu [14,15].

Ponieważ metoda przekąźnikowa okazała się wystarczająco odporna na oddziaływanie zakłóceń, jest ona coraz częściej wykorzystywana w nowych modelach sterowników do ich automatycznego dostrajania w trybie ST (Self Tuning). Odbywa się ono na podstawie wyznaczanych parametrów cyklu granicznego i jest nakierowane na zapewnienie odpowiedniego zapasu fazy i modułu.

W niniejszej pracy przedstawiony został projekt komputerowego układu sterowania nadrzędnego pracą

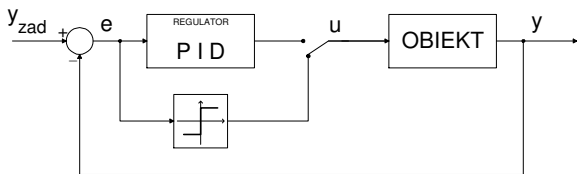
autonomicznych układów regulacji, odwołujący się do sformułowanych zależności na wybrane modele transmitancyjne, i wspierający się w procesie rozpoznawania jego struktury analizą kształtu drgań.

### 2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Zadaniem modelu jest możliwie najlepsze odwzorowanie właściwości dynamicznych i statycznych obiektu przy jednoczesnym spełnieniu wymogu co do jego dopuszczalnej złożoności. Przez wiele lat możliwości właściwego doboru nastaw regulatora hamował brak prostego sposobu na utworzenie lepszych modeli niż inercja pierwszego rzędu czy idealny człon całkujący. Większość metod doboru nastaw regulatorów opierało się na założeniu, że będą one sterować obiektami o takich transmitancjach. Gdy ten warunek nie był spełniony, dobrane nastawy musiały być korygowane lub nie pozwalały osiągnąć stawianych celów. Postęp w dziedzinie tworzenia modeli transmitancyjnych, jaki dokonał się w ostatnich 30 latach, stworzył nowe warunki w podejściu do problemu dostrojenia układów regulacji. Proponowany w tym artykule układ wykorzystuje znacznie szerzej możliwości metody przekąźnikowej, niż ma to miejsce w sterownikach wyposażonych w funkcję automatycznego dostrojenia ST. Jego zadaniem jest zapewnienie, poprzez okazjonalne dostrajanie regulatorów, możliwie najlepszej jakości sterowania w sprzężonych z nim układach, ale do dostrojenia układu regulacji stosuje, jak ma to miejsce w adaptacji pośredniej, model obiektu. Stwarza to większe możliwości przy kształtowaniu dynamiki układów regulacji także tych, w których model jest integralną częścią regulatora. Jednocześnie stawia też nowe wyzwania w procesie tworzenia modelu, gdyż zakłada się, że układ nie powinien wymagać żadnej wiedzy a priori o badanym obiekcie. Poszerza to zakres jego zadań o dokonanie wyboru klasy wyznaczanego modelu.

### 3. METODA IDENTYFIKACJI

Do wyznaczania modelu obiektu wykorzystana została tzw. metoda przekąźnikowa. Bazuje ona na pomiarze drgań krytycznych o ograniczonej amplitudzie, które w układzie zamkniętym generowane są przy pomocy elementu dwupołożeniowego, włączonego równolegle do regulatora (rys. 1).



Rys.1 Schemat ideowy wykorzystania regulatora dwupołożeniowego do generowania drgań w układzie regulacji

Po wytrąceniu układu regulacji ze stanu równowagi, w pętli sprzężenia zwrotnego mogą być generowane drgania harmoniczne o stałej amplitudzie  $A$  oraz okresie  $T_{osc}$ . Zgodnie z twierdzeniem Nyquista, warunkiem powstania drgań harmonicznnych w układzie zamkniętym jest, by charakterystyka amplitudowo-fazowa układu otwartego przechodziła przez punkt krytyczny płaszczyzny zmiennej zespolonej  $(-1,0j)$ . Do analizy pracy tego układu nieliniowego należy posłużyć się funkcją opisującą  $J(A, \omega)$ , zależną w ogólnym przypadku od pulsacji i amplitudy sygnału wejściowego. Warunkiem powstania drgań będzie równość

$$G(j\omega) \cdot J(A, \omega) = -1 + 0j \quad (1)$$

która przekłada się na dwa warunki

$$|G(j\omega_o)| = \left| \frac{1}{J(A)} \right| \quad \text{oraz} \quad \arg G(j\omega_o) + \arg(J(A)) = -\pi \quad (2)$$

Pomiar amplitudy i okresu tych drgań umożliwi wyznaczenie parametrów cyklu granicznego czyli pulsacji krytycznej

$$\varphi(\omega_{kr}) = -\pi \quad (3)$$

$$\omega_{kr} \approx \frac{2\pi}{T_{osc}} \quad (4)$$

i wzmocnienia krytycznego

$$K_{kr} \approx \frac{4 \cdot B}{\pi \cdot \sqrt{A^2 - \varepsilon^2}} \quad (5)$$

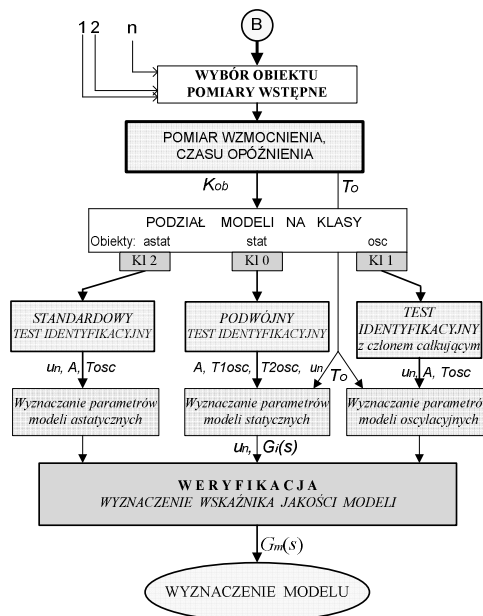
gdzie:  $B$  – amplituda wyjścia z przekładnika,  $\varepsilon$  – szerokość strefy histerezy elementu dwupołożeniowego

Dzięki wyznaczeniu pojedynczego punktu charakterystyki częstotliwościowej układu otwartego, przy założeniu postaci transmitancji modelu, można wyznaczyć jej dwa parametry.

#### 4. UKŁAD IDENTYFIKACJI MODELU OBIEKTU

Koncepcja opracowanego układu sterowania nadrzędnego opiera się na założeniu, że komputer centralny ma połączenie sygnałowe z kilkoma regulatorami, pracującymi w autonomicznych, jednowymiarowych układach regulacji. Może on czytywać dane pomiarowe badanej pętli takie jak wielkość regulowana  $y_n$ , wielkość sterująca zadana  $u_{zad}$  i realizowana  $u_n$ , uchyb regulacji  $e_n$ . Na ich podstawie obliczane są przyjęte wskaźniki jakości sterowania, np. całka z kwadratu uchybu regulacji. Jądro tego systemu stanowi program komputerowy, który w środowisku Matlab/Simulink wykonuje opracowane algorytmy. W celu łatwiejszego komunikowania się z programem opracowany został prosty interfejs graficzny GUI.

Sam proces identyfikacji obejmuje kilka kroków. Są one schematycznie przedstawione na rysunku 2. Główna idea programu opiera się na dokonaniu selekcji badanych obiektów i przypisaniu ich do wybranych klas modeli. Po dokonaniu tego podziału w celu pozyskania wymaganych danych pomiarowych przeprowadzany jest stosowany test identyfikacyjny. Poprawne przeprowadzenie eksperymentu identyfikacyjnego, skutkującego wygenerowaniem drgań krytycznych o ograniczonej amplitudzie wymaga zmiany struktury układu regulacji polegającej na równoległym dołączeniu do regulatora elementu dwupołożeniowego, ustawienia jego parametrów, tak aby zapewnić właściwy przebieg próby oraz odczytu mierzonych wielkości. Ważnym jest wybór poziomu wyjścia z przekładnika  $B$ , tak aby amplituda generowanych drgań nie przekraczała dopuszczalnego poziomu ( $A < a \cdot y_{ust}$ , gdzie  $a$  jest współczynnikiem liczbowym z zakresu 0-0.1), jednocześnie nie była zbyt mała w stosunku do szumu pomiarowego, oraz szerokości strefy histerezy  $\varepsilon$ , która powinna być jak najmniejsza, jednak nie mniejsza niż dwukrotna wartość odchylenia standardowego szumu pomiarowego. Zbyt mała wartość strefy histerezy wydłuży czas uzyskania powtarzalnych wartości pomiaru okresu oscylacji. Natomiast, zbyt duża prowadzi do zdeformowania oscylacji i jej asymetrii. Przy wykonywaniu testu identyfikacyjnego zakłada się, że cykl graniczny jest stabilny, jeżeli amplitudy i okresy trzech kolejnych oscylacji nie różnią się więcej od siebie niż o 2%. Następnie w oparciu o uzyskane wyniki pomiarów sporządzane są wszystkie typy modeli z danej klasy, to znaczy, dla każdego z tych modeli wyznaczane są jego parametry. Ostatecznego wyboru modelu program dokonuje na podstawie porównania obliczonych wskaźników jakości modelu.



Rys. 2. Algorytm programu obliczeniowego

#### 4.1. Baza modeli

Bazę modeli tworzą modele należące do 3 klas: klasa 0-grupuje modele inercyjne, 1-modele oscylacyjne, 2- modele astatyczne. Każda z nich zawiera od 2 do 6 typów modeli różnego rzędu. Parametry modeli inercyjnych  $n$ -ego rzędu o stałej czasowej inercji  $T_n$  oraz stałej czasowej opóźnienia  $T_{0n}$ , których transmitancja jest równa

$$G_n(s) = \frac{K_m}{(1+T_n s)^n} \cdot e^{-T_{0n}s} \quad (6)$$

gdzie:  $K_m$  - wzmacnienie statyczne,  $n$ - rząd inercji (1,2,...)

wyznaczane są na podstawie zależności

$$T_n = \omega_{kr}^{-1} \sqrt[n]{\frac{16K_m^2 B^2}{A^2 \pi^2} - 1} \quad (7)$$

$$T_{0n} = \omega_{kr}^{-1} [\pi - n \cdot \arctg(\omega_{kr} T_n)] \quad (8)$$

$$n=10^x, \quad \text{gdzie: } x=1,9040-1,3736 T_{obw}/T_{osc} \quad (9)$$

Ponieważ poprawne, analityczne wyznaczenie właściwego opóźnienia tego modelu jest wrażliwe na właściwe oszacowanie jego rzędu, parametr  $T_{0n}$  przy  $n>5$  wyznaczany jest również na drodze pomiarowej. Parametry najczęściej stosowanego modelu I-ego rzędu z czasem opóźnienia wyznaczone są nie tylko na podstawie zależności (7,8), ale również w oparciu o wzory Majhi i Athertona [6]

$$T_m = \frac{\pm T_{osc}}{2 \ln[(1 \pm \frac{A}{K_m B}) / (1 \mp \frac{A}{K_m B})]} \quad T_0 = \pm T_m \cdot \ln[(1 \pm \frac{A}{K_m B})] \quad (10)$$

Człony drugiego rzędu z samowyrównaniem reprezentowane są przez człony oscylacyjne, człony o podwójnych biegunach i tzw. model Kupfmüllera. Transmitancja modelu określanego jako człon oscylacyjny z opóźnieniem przedstawiona może być w postaci:

$$G_{osc}(s) = \frac{K_m}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1} e^{-T_0 s} \quad (11)$$

gdzie:  $T$  - okres drgań własnych,

$\xi$  - bezwymiarowy współczynnik tłumienia

Metodę wyznaczania modelu członu oscylacyjnego bez opóźnienia podają w pracy [3] Viteckova i Vitecek. Wymaga ona włączenia za przekaźnikiem bez histerezy członu całkującego, przez co zmieniają się współrzędne punktu krytycznego. Aby układ znalazł się na granicy stabilności, wystarczy by opóźnienie, wprowadzane przez człon, było równe tylko -90 stopni. Tym samym identyfikowane parametry członu oscylacyjnego, jak bezwymiarowy współczynnik tłumienia i okres drgań własnych, będą odpowiednio równe

$$\xi = \frac{K_m T_{osc} B}{A \pi^2} \quad (12)$$

$$T = T_{osc} / 2\pi \quad (13)$$

Człon inercyjny drugiego rzędu z czasem opóźnienia  $T_0$  o transmitancji (14) określaną bywa modelem Kupfmüllera.

$$G_{Ku}(s) = \frac{K_m}{(1+T_1 s) \cdot (1+T_2 s)} e^{-T_0 s} \quad (14)$$

gdzie:  $K_m$  - wzmacnienie statyczne,  $T_1, T_2$  - stałe czasowe,  $T_0$  - czas opóźnienia

Do wyznaczenia tego modelu posłużono się metodą opisaną w [7], przy zastosowaniu zależności

Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG, ISSN 2353-1290, Nr 60/2018

$$T_1 + T_2 = \frac{tg(\varphi_1) \cdot tg(\varphi_2 - 0.5\pi) \cdot (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\omega_1 \omega_2 \cdot [tg(\varphi_2 - 0.5\pi)\omega_2 - tg(\varphi_1)\omega_1]} \quad (15)$$

$$T_1 T_2 = \frac{tg(\varphi_2 - 0.5\pi) \cdot \omega_1 - tg(\varphi_1) \cdot \omega_2}{\omega_1 \omega_2 \cdot [tg(\varphi_2 - 0.5\pi)\omega_2 - tg(\varphi_1)\omega_1]} \quad (16)$$

$$T_{1,2} = 0.5 \cdot [T_1 + T_2 \pm \sqrt{(T_1 + T_2)^2 - 4(T_1 T_2)}] \quad (17)$$

w których  $\varphi_1, \varphi_2$  oznaczają opóźnienia fazowe, jakie przy uzyskanej pulsacji krytycznej  $\omega_{kr1}, \omega_{kr2}$  wprowadza do układu otwartego człon opóźniający o stałej czasowej  $T_0$ ,  $\omega_1, \omega_2$  - pulsacje drgań z testu podstawowego i uzupełniającego

Obiekty astatyczne z inercją i opóźnieniem opisane są przy pomocy transmitancji

$$G_{ai}(s) = \frac{K_i}{s(1+T_i s)^i} \cdot e^{-T_{0i}s} \quad (18)$$

gdzie:  $K_i$  - wzmacnienie prędkościowe

$i, T_i$  - rząd oraz stała czasowa inercji

Do wyznaczenia takiego modelu służą następujące zależności:

$$T_i = K_i^{-1} = \omega_{kr}^{-1} \sqrt[i]{\frac{4K_m^2 T_{osc}^2 B^2}{A^2 \pi^4} - 1} \quad (19)$$

$$T_{0i} = \omega_{kr}^{-1} [\pi / 2 - i \cdot \arctg(\omega_{kr} T_i)] \quad (20)$$

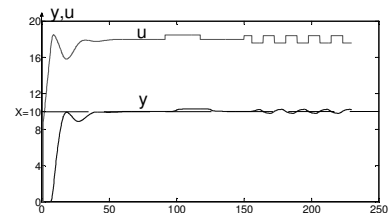
## 4.2. Bloki funkcyjne układu

Program, wyznaczający model obiektu, można podzielić na bloki realizujące określone funkcje, do których należą:

- pomiary wstępne
- wybór klasy modelu
- przeprowadzenie podstawowej próby przekaźnikowej
- test uzupełniający
- wyznaczenie parametrów modeli i ich weryfikacja
- wybór modelu suboptymalnego

## Pomiar wzmacnienia statycznego

Zainicjowanie działania programu uruchamia funkcję przeprowadzenia wstępnego eksperymentu identyfikacyjnego, obejmującego pomiar wzmacnienia statycznego oraz czasu opóźnienia. Przykładowe przebiegi sygnału sterującego i wyjścia z obiektu w początkowej fazie eksperymentu zamieszczone są na rysunku 3.



Rys. 3. Przebiegi wejścia i wyjścia z obiektu w początkowej fazie testu

Na tym etapie przeprowadzana jest analiza kształtu drgań jak i reakcji obiektu na skokową zmianę wielkości sterującej, wywołanej zmianą stanu przekaźnika

o rozszerzonej do  $\varepsilon_2$  wartości strefy histerezy, co pozwala przeprowadzić ten pomiar *off-line*, z wyłączeniem sprzężenia zwrotnego.

Do pomiaru wzmocnienia statycznego obiektu regulacji  $K_{ob}$  wybrano metodę bazującą na badaniu przyrostów wielkości regulowanej i sterującej w stanie ustalonym [7].

Do przeprowadzenia tego pomiaru wymagane jest:

- utrzymanie wielkości sterującej na stałym poziomie  $u(t_p)$  od chwili rozpoczęcia eksperymentu  $t_p$  przez cały czas jego trwania
- ustalenie szerokości strefy histerezy  $\varepsilon_2$  tak, aby była ona większa od reakcji obiektu  $\Delta y$  na przyrost wielkości sterującej o wartość wyjściową z przekaźnika  $B$ .

Gdy w przekaźniku szerokość histerezy zostanie powiększona tak, aby spełniony był warunek

$$\varepsilon_2 > K_{ob} B \quad (21)$$

wielkość sterująca zostanie zmieniona o sygnał wyjściowy z elementu przekaźnikowego. Wówczas wzmocnienie statyczne  $K_m$  oszacować można z zależności

$$K_m = \Delta y / B \quad (22)$$

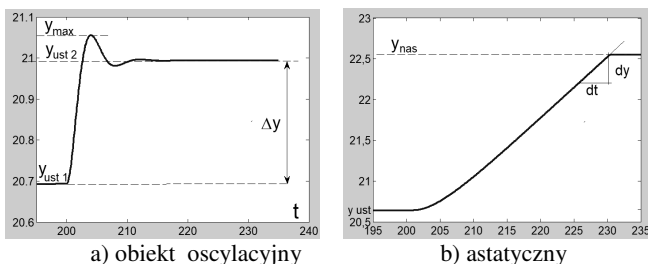
Ten pomiar jest również wykorzystywany do pozyskania informacji o ewentualnym opóźnieniu oraz charakterze odpowiedzi obiektu na skokową zmianę wymuszenia. Przydział obiektu do jednej z trzech klas modeli (0-2) dokonuje się po selekcji obiektów z samowyrównaniem oraz astatycznych, których odpowiedź będzie rosła aż do osiągnięcia stanu nasycenia ogranicznika ustalanego na poziomie  $y_{nas}$  (rys. 5b). Wzmocnienie prędkościowe takiego obiektu jest równe

$$K_i = dy/dt \quad (23)$$

Jeżeli natomiast zajdzie warunek, jak ma to miejsce na rysunku 4a, że

$$y_{max} > y_{ust2} \quad (24)$$

to taki człon zakwalifikowany zostanie do klasy obiektów oscylacyjnych.



Rys.4. Przebiegi wielkości regulowanej w trakcie pomiaru wzmocnienia statycznego

Poprawność wyboru klasy modelu jest dodatkowo sprawdzana w bloku analizującym kształt drgań krytycznych. Po dokonaniu wyboru klasy modelu eksperyment identyfikacyjny realizowany jest pod kątem pozyskania wymaganych danych pomiarowych, niezbędnych do wyznaczenia modeli, należących do wybranej klasy. Na podstawie otrzymanych danych pomiarowych i zależności, przedstawionych w następnym podrozdziale, określane są

wymagane parametry modeli wszystkich typów z danej klasy.

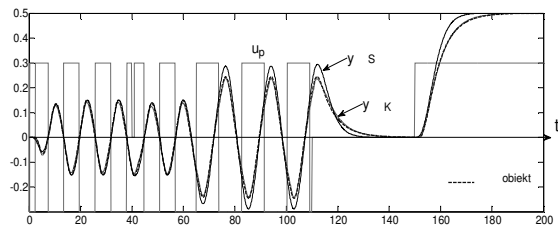
### Blok pomiarów uzupełniających

Gdy wykryty zostanie obiekt oscylacyjny ze znikomym czasem opóźnienia, to na czas trwania tej próby włączany jest szeregowo z obiektem człon całkujący. Zapewni on dodatkowe opóźnienie fazowe o kąt równy -90 stopni, co ułatwi rozwinięcie cyklu granicznego.

Gdy wymagane jest pozyskanie dodatkowych danych na potrzeby utworzenia modeli o większej liczbie parametrów, musi być przeprowadzona kolejna próba przekąźnikowa. Układ przeprowadzi ją po uprzednim dokonaniu w strukturze badanej pętli regulacji zmian, polegających na wprowadzeniu do układu otwartego elementów o znanym przesunięciu fazowym. Pozyskane tą drogą dane, przy zastosowaniu odpowiedniego algorytmu obliczeniowego, mogą też służyć do wyznaczenia dodatkowych parametrów modelu rozszerzonego. Jej wyniki przekazywane są do bloku weryfikacji modeli.

### 4.3. Weryfikacja i wybór optymalnego modelu

Program ma za zadanie wyznaczyć model, który najwierniej oddawać będzie zachowanie obiektu. W celu porównania obiektu i modelu poddawane są one temu samemu wymuszeniu. Dane o sygnale sterującym, czyli wyjściu elementu dwupołożeniowego, podczas testu identyfikacyjnego są zapamiętane, a następnie po wyznaczeniu modeli służą do symulacji ich odpowiedzi. Te są później porównywane z wyjściem obiektu i pośrednio między poszczególnymi modelami. Przykładowe przebiegi sygnałów obiektu oraz modelu Kupfmüllera i Strejca zamieszczone są na rysunku 6. Przy wyższej częstotliwości oba modele podobnie odtwarzają reakcję obiektu, jednak przy niższych częstotliwościach, włączając tę dążącą do zera, różnice te zwiększają się.



Rys. 5. Przebieg próby weryfikującej modele. S-model Strejca  $n=4$ , K - model Kupfmüllera

Jeżeli obiekt liniowy i model byłyby opisane przy pomocy tej samej transmitancji, to za kryterium jakości można przyjąć różnice między obydwiema odpowiedziami skokowymi. Jeżeli jednak mamy do czynienia z modelami zredukowanym, czyli o niższym rzędzie niż sam obiekt, to takie kryterium może okazać się mylące i nie powinno być jedyną podstawą modelowania. Rozważania na temat jakości modeli z opóźnieniem, w kontekście wykorzystania ich w sterowaniu samonastrajalnym, prowadzone były w pracach Bristola [5], a także Hanga i China [4]. Uwzględnienie czasu opóźnienia przybliży zachowanie modelu do obiektu rzeczywistego przy większych opóźnieniach fazowych. Dla przeprowadzenia wyboru modeli posłużono się wskaźnikami, które wyrażone są przy pomocy całki z wartości bezwzględnej przebiegu drgań krytycznych oraz drgań, które ukształtują się przy dodaniu do pętli sprzężenia zwrotnego dodatkowego opóźnienia.

$$WJ_1 = \frac{10}{t_{k1} - t_{o1}} \int_{t_{o1}}^{t_{k1}} (|y(t)| - |y_m(t)|) dt \quad (25)$$

$$WJ_2 = \frac{10}{t_{k2} - t_{o2}} \int_{t_{o2}}^{t_{k2}} |y(t) - y_m(t)| dt \quad (26)$$

gdzie:  $y, y_m$  – wyjście z obiektu i modelu

Program wskaże model o numerze przypisanym mu w bazie modeli, dla którego

$$Q = \min\{ WJ_1, WJ_2, \dots, WJ_p \} \quad (27)$$

gdzie:  $p$  – liczba modeli danej klasy

osiągnie najmniejszą wartość.

## 5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

W celu przetestowania poprawnej pracy układu przeprowadzone zostały badania symulacyjne. Układ był podłączany do jednej z pętli regulacji i przeprowadzał test identyfikacyjny przy uwzględnieniu ewentualnego ograniczenia co do wysokości jego rzędu. Wyniki tych badań zawarte są w tabelach 1 i 2. Obiekty 1-6 miały transmitancje tego samego typu, co jeden z modeli znajdujących się w bazie. Tabela 1 ukazuje numer transmitancji identyfikowanego obiektu, wskaźniki jakości wybranych modeli, a także wyznaczoną transmitancję modelu.

W pierwszym etapie przebadano obiekty o następujących transmitancjach

$$G_1(s) = \frac{0.8}{6s+1} \cdot e^{-1.5s} \quad G_2(s) = \frac{3}{16s^2+8s+1} \cdot e^{-2s}$$

$$G_3(s) = \frac{2}{20s^2+12s+1} \cdot e^{-3s} \quad G_4(s) = \frac{2.5 \cdot e^{-s}}{16s^4+32s^3+24s^2+8s+1}$$

$$G_5(s) = \frac{0.17}{3s^2+s} \cdot e^{-s} \quad G_6(s) = \frac{1}{s^2+s+1} \cdot e^{-0.3s}$$

Tab. 1 Modele obiektów wzorcowych

Nr obiektu	Wsk. jakości wybr. modelu		model		Transmitancja modelu
	$W_{J1}$	$W_{J2}$	klasa	typ	
1 0,0741	0,023	0,2190	0	1	$\frac{0.8}{6.018s+1} \cdot e^{-1.5s}$
2 0,3103	0,045	0,0529	0	3	$\frac{3}{(13.9s+1)^2} \cdot e^{-2.08s}$
3 0,1749	0,0729	0,1075	0	4	$\frac{2}{18.02s^2+12.95s+1} \cdot e^{-3.21s}$
4 0,2822	0,0306	0,1164	0	5	$\frac{2.5}{(1+1.9783s)^4} \cdot e^{-1.08s}$
5 0,2156	0,209	0,4065	2	1	$G_5(s) = \frac{0.1698}{3.007s^2+s} \cdot e^{-1.08s}$
6 0,1585	0,0116	0,1127	1	2	$\frac{1}{1.313s^2+1.029s+1} \cdot e^{-0.3s}$

Wyniki identyfikacji modeli obiektów, których transmitancje pokrywają się z typami modeli dostępnymi w bazie, pokazują, że w każdym z badanych przypadków układ wybiera właściwą klasę modelu, a następnie z dużą dokładnością wyznacza jego parametry.

Obiekty 21-24 są obiektami złożonymi. W ich przypadku układ miał wyznaczyć model przy występowaniu tzw. nieokreśloności modelowej.

$$G_{21}(s) = \frac{1.5}{1.2s^3+2.3s^2+4.5s+1} e^{-2s}$$

$$G_{22}(s) = \frac{2.5 \cdot e^{-s}}{9.6s^4+26.8s^3+29.7s^2+13.25s+1.5}$$

$$G_{23}(s) = \frac{1.5}{0.12s^4+1.096s^3+2.92s^2+2.6s+2}$$

$$G_{24}(s) = \frac{3.1}{16.5s^4+55.25s^3+50.75s^2+13s+1} e^{-3s}$$

$$G_{25}(s) = \frac{20s^2+22s+6}{5397s^6+8082s^5+5254s^4+1958s^3+449.8s^2+59.85s+3.5} e^{-3s}$$

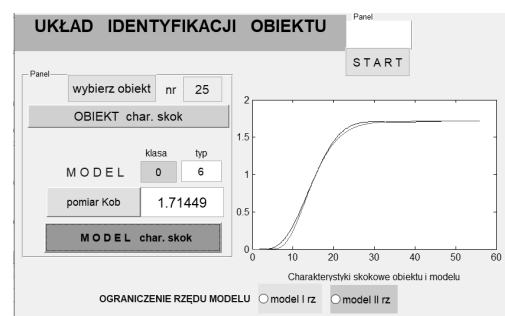
Wyniki symulacji procesu identyfikacji przedstawione zostały w tabeli 2.

Tab. 2 Modele obiektów złożonych

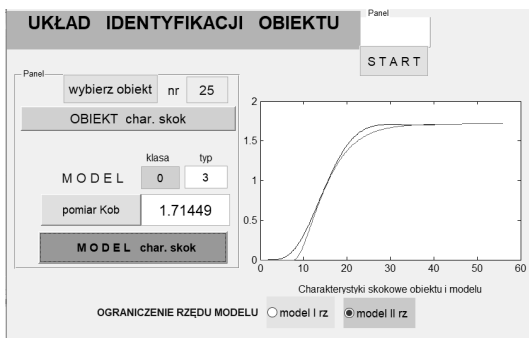
obiekt	Wsk. jakości wybr. modelu		model		Transmitancja modelu
	$W_{J1}$	$W_{J2}$	klasa	typ	
21 0,1809	0,0966	0,1084	0	1	$\frac{1.5}{4.195s+1} e^{-2.54s}$
22 0,1709	0,0342	0,0578	0	4	$\frac{1.667}{13.05s^2+7.836s+1} \cdot e^{-2.01s}$
23 0,1331	0,0275	0,1377	1	1	$\frac{0.75}{1.425s^2+0.9104s+1}$
24 0,3168	0,0249	0,0579	0	4	$\frac{3.1}{33.1s^2+11.51s+1} \cdot e^{-4.48s}$
25 0,2287	0,0072	0,0901	0	6	$\frac{1.714}{(1+2.3544s)^5} \cdot e^{-3.55s}$

Przebieg testu weryfikacyjnego dla obiektu o transmitancji  $G_{22}(s)$  przedstawiony został na rysunku 5. Przy wyższej częstotliwości wymuszenia oba modele podobnie odtwarzają reakcję obiektu, jednak dla niższych częstotliwości model Kupfmüllera wyraźnie lepiej oddaje właściwości obiektu niż model Strejca 4-ego rzędu, co odzwierciedlają również wskaźniki  $W_{J1}$  i  $W_{J2}$ .

Rysunek 6 przedstawia zeskanowany obraz interfejsu graficznego użytkownika ukazujący wynik identyfikacji obiektu o transmitancji  $G_{25}(s)$  w przypadku bez ograniczenia, zaś rysunek 7 z ograniczeniem rzędu modelu do  $n=2$ , co może być wymagane w przypadku potrzeby dostrojenia regulatora PID. Układ przy tych warunkach dobrał odpowiednio model Kupfmüllera oraz model 2-ego rzędu wyznaczony z zależności (7,8).



Rys.6. Wyznaczanie modelu obiektu  $G_{25}(s)$



Rys.7. Wyznaczanie modelu II-ego rzędu obiektu  $G_{25}(s)$

$$G_2(s) = \frac{1.714}{(1 + 4.0873s)^2} \cdot e^{-7.75s}$$

## 6. PODSUMOWANIE

Przedstawiony w pracy projekt układu stanowi autorskie podejście rozwiązania problemu utworzenia modelu obiektu bez wymaganej wiedzy wstępnej o jego właściwościach. Do wyznaczenia modeli układ wykorzystuje znane zależności od parametrów cyklu granicznego, a w celu przyporządkowania ich do określonej klasy stosuje metodę, bazującą na analizie odpowiedzi obiektu na sygnał wyjściowy z elementu dwupołożeniowego. Wyniki symulacji procesu identyfikacji modeli obiektów pokazują, że w każdym z badanych przypadków układ określa poprawnie klasę modelu, a następnie wyznacza parametry modeli wszystkich typów danej klasy i na podstawie przyjętego kryterium oceny jakości wybiera spośród nich najlepszy. Ich jakość zależy oczywiście od stopnia nieokreśloności modelu oraz dokładności pomiarów parametrów drgań krytycznych. Zakres działania układu może być poszerzony o dalsze funkcje, jak na przykład automatyczną identyfikację obiektów w układzie regulacji kaskadowej. Rozbudowana może być również baza modeli o człony oscylacyjne z większym opóźnieniem, czy obiekty z dodatnim zerem.

Dla pełniejszej oceny i potwierdzenia przydatności układu do wypełnienia swoich zadań wymagana jest w dalszej perspektywie jego weryfikacja w układach fizycznych. Do tego celu przygotowany został układ regulacji prędkością obrotową silnika elektrycznego z enkoderem przy pomocy sterownika PLC S7 1200 oraz układ regulacji poziomem wody w zbiorniku o swobodnym wpływie, wykorzystujący model wewnętrzny.

## IDENTIFICATION SYSTEM OF SUBOPTIMAL MODEL OF LINEAR PLANT

The paper presents the concept of conducting by the control system a superior periodic identification in the on-line mode of objects controlled by direct action regulators working in autonomous loops controlled by this system. The purpose of this identification is in the case of detection of exceeding the specified quality standards, automated creation of the best, in the sense of the accepted criterion, the model of the object and then, based on this model, the tuning of the appropriate regulator or inclusion in the structure of the supervised control system. The Åström-Hägglund method was used to identify the models. The paper presents a brief description of the measurements carried out and the relationships used to calculate the required parameters of various models. Simulation tests of the identification process were carried out and their results in the form of a table were attached to the article.

**Key-words:** Limit cycles, Relay feedback test, Autotuning, Model identification.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Åström K.J., Hägglund T. : Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. *Automatica* 20,(1984) s.645.
2. Tan K.K., Lee T.H., Jiang X. : On-line relay identification, assessment and tuning of PID controller. *Journal of Process Control* 11, 2001.
3. Viteckova M., Vitcek A. : Experimental Plant Identification by Relay Method *Transactions of the VSB- Technical University of Ostrava*, Vol.L1, No 2.
4. Hang C.C., Chin D.; *Reduced Order Process Modelling In Self-tuning Control*, Automatic, Vol.27, No.3,1991, s.529-534.
5. Bristol,E.H.: Pattern recognition: an alternative to parameter identification in adaptive control, *Automatica*,13, 1977 , s.197-202.
6. Majhi S., Atherton D.P.: Obtaining controller parameters for a new Smith predictor using autotuning, *Automatica* 36, 2000, s. 1651-1658.
7. Kula K.S.: Wykorzystanie metody przekąźnikowej do sformułowania modelu Kupfmüllera, *Aktualne problemy automatyki i robotyki*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2014,s. 168-175.
8. Kula K.: Metoda Zwiększenia dokładności modeli uzyskiwanych metodą przekąźnikową, *Zeszyty Naukowe WEiA PG nr 57*,2017, s.55-60.
9. Sung S.W., Lee I.: An improved algorithm for automatic tuning of PID controllers, *Chemical Engineering Science* 55, 2000, s. 1883-1891.
10. Åstrom K.J.,Hägglund T. : Automatic tuning of PID controllers, *Instrument Society of America*, 1988.
11. Ching R.C., Shen S.H., Yu C.C. : Derivation of transfer function from relay feedback systems, *Ind. Eng. Chem. Res.*31, 1992, s.855-860.
12. Huang H.P., Lee M.W., Chien I.L. : Identification of transfer function models from the relay feedback test, *Chem. Eng. Comm.*, 180, 2000, s. 231-253.
13. Shen S.H., Yu H.D., Yu C.C. : Use of saturation-relay feedback method for autotune identification, *Chem. Eng. Sci.* 51, 1996, p.1187-1198.
14. Panda R.C., Yu C.C. : Analytical expressions for relay feedback responses, *J.Process Control*, Nr 13 (6), 2003, s.489-501.
15. Panda R.C., Yu C.C. : Shape factor of relay response curves and its use in autotuning, *J.Process Control*, Nr 15, 2005, s.893-906.