

Błąd płaszczyzny sterownika rozmytego w inteligentnym układzie automatycznej kontroli wzmocnienia

Streszczenie. W artykule przedstawiono mankamenty i problemy metrologiczne w pomiarach prądu i napięcia w układach pomiarowych składających się z kaskadowego połączenia wzmacniacza operacyjnego, filtra dolnoprzepustowego, przetwornika analogowo cyfrowego oraz mikroprocesorowego systemu zbierania danych. Autorzy pracy podali także zalety sterowania rozmytego w układach cyfrowych oraz możliwość wykorzystania tego inteligentnego sterownika w układzie automatycznej korekcji wzmocnienia pozwalającego na modyfikację stałej przetwarzania analogowego toru w sposób ciągły. W niniejszej pracy także opisano także przyczynę powstania błędu powierzchniowego sterownika Mamdani'ego oraz jego niwelację i wpływ na właściwości metrologiczne układu korekcji.

Abstract. The paper presents shortcomings and metrological problems in the measurement of current and voltage in measurement systems consisting of a cascade connection of an operational amplifier, a low-pass filter, an analogue-digital converter and a microprocessor data acquisition system. The authors also gave the advantages of fuzzy control in digital circuits and the possibility of using this intelligent controller in the automatic gain correction system allowing modification of the gain factor analog path in a continuous manner. This paper also describes the cause of the surface error of the Mamdani controller and its leveling and influence on the metrological properties of the correction system. (**Fuzzy controller surface error in the intelligent automatic gain control system**).

Słowa kluczowe: scalony licznik energii, automatyczna kontrola wzmocnienia, sterownik rozmyty.

Keywords: integrated watt-hour meter, automatic gain control, fuzzy controller.

Wstęp

Wejściowe obwody nowoczesnych układów scalonych służące do: pomiaru prądu, napięcia, mocy oraz energii elektrycznej zbudowane są z układów wzmacniaczy operacyjnych pracujących w strukturze równoległej połączone z przetwornikiem analogowo-cyfrowym wysyłającym dane pomiarowe do systemu mikroprocesorowego. Przetwornik wielkości mierzonej (prądu lub napięcia) podłączony jest bezpośrednio do zacisków wejściowych ww. wzmacniacza. Głównym zadaniem tego przetwornika jest obniżenie wartości mierzonej do zakresu wejściowego przetwornika A/C wraz z zapewnieniem izolacji galwanicznej pomiędzy badanym sygnałem po stronie obciążenia, a systemem zbierania danych (mikrokontroler) [1]. Tego typu obwód (zwany dalej - klasycznym) pozwala na dokładny pomiar wielkości mierzonej (prądu lub napięcia), której wartość szczytowa nie zmienia się w sposób dynamiczny w całym zakresie przetwarzania wejściowego układu A/C. Wzmacniacze pracujące w torach wejściowych systemu pomiarowego o dobranym stałowartościowym wzmocnieniu lub cyfrowo zmiennym (układy PGA) w czasie pomiaru sygnałów dynamicznie zmiennych np. takich jak prądy wejściowe trójfazowych napędowych falowników typu DC/AC są nieprzydatne ze względu na pojawiający się duży błąd pomiarowy [2]. Autorzy artykułu zaprojektowali obwód automatycznej kontroli wzmocnienia wykorzystujący sterownik rozmyty pozwalający na polepszenie właściwości metrologicznych systemu pomiarowego. Zadaniem sterownika rozmytego jest wygenerowanie takiej stałej przetwarzania, która zapewnia wzmocnienia dynamicznie zmiennego sygnału mierzonego tak, aby osiągnął górną granicę napięcia referencyjnego przetwornika A/C pracującego na wejściu toru pomiarowego. Na podstawie doświadczenia autorów w dziedzinie sterowania rozmytego w artykule przedstawiono możliwość sposobu minimalizacji błędu płaszczyzny odwzorowującej pracę sterownika rozmytego. Zasadę działania inteligentnego układu wyznaczania stałej przetwarzania przedstawiono w dalszej części artykułu.

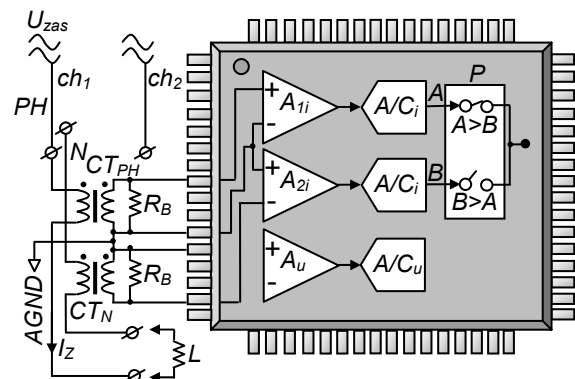
Obwody wejściowe przetwarzające wejściowy sygnał analogowy w scalonych strukturach przetworników mocy i energii elektrycznej

Sygnały wejściowe przetworników A/C należy wzmocnić

tak, aby pomiar ich odbywał się z jak największą rozdzielczością. W systemach pomiarowych prądu, napięcia, mocy oraz energii elektrycznej do tego celu stosuje się obwód typu front-end (pośredniczący pomiędzy przetwornikiem wielkości wejściowej, a przetwornikiem A/C systemu pomiarowego) zawierający scalony przedwzmacniacz o regulowanym wzmocnieniu napięciowym. Zaawansowane scalone konstrukcje układów pomiarowych prądu oraz napięcia wykorzystują często do tego celu wzmacniacze:

- niskoszumowe typu LAN (ang. Low Noise Amplifier) o dobranym stałowartościowym wzmocnieniu,
- o programowalnym współczynniku wzmocnienia typu PGA (ang. Programmable Gain Amplifier),
- o wzmocnieniu sterowanym analogowo typu: VGA (ang. Variable Gain Amplifier).

Przykładem elektronicznych obwodów pomiarowych wykorzystujących ww. techniki sterowania stałej przetwarzania sygnału wejściowego przetwornika A/C są zintegrowane jednofazowe liczniki energii elektrycznej (np. układy firmy Analog Device typu: AD7750, ADE7761 ADE7769) o strukturze wewnętrznej przedstawionej na rys. 1.



Rys. 1. Obwód elektroniczny scalonego jednofazowego licznika energii elektrycznej, gdzie: ch_1 , ch_2 – wejściowe kanały prądowy i napięciowy, $AGND$ – analogowy punkt odniesienia (masa), I_z – prąd obciążenia [3]

Wejściowy obwód elektryczny scalonego układu licznika energii elektrycznej wyposażony jest w monitor awarii przewodu fazowego (oznaczonego na rys. 1 symbolem - PH) oraz neutralnego (oznaczonego na rys. 1 symbolem - N). Przewód zasilający (PH) elektryczne obciążenie (L) napięciem U_{zas} oraz powrotny (N) podłączone są do zacisków strony pierwotnej dwóch identycznych indukcyjnych przetworników prądowych CT_{PH} oraz CT_N .

System scalonego licznika energii elektrycznej ma możliwość wykrycia różnicy wartości pomiędzy napięciami na rezystorach obciążenia R_B (podłączonych do zacisków wyjściowych przetworników prądu: CT_{PH} , CT_N) o wartość większej niż 6.25%. Wówczas wskaźnik błędu licznika staje się aktywny. Ponadto w przypadku, gdy zajdzie nierówność $V_B > V_A$ (gdzie: V_A , V_B – numeryczne wartości wyjściowe z przetworników A/C_i), scalony licznik energii elektrycznej wybiera programowo za pomocą układu przełącznika (oznaczony symbolem - P na Rys. 1) sygnał V_B jako jego wejście prądowe [3]. Takie rozwiązanie pozwala na dokładny pomiar prądu w przypadku, gdy elektryczna awaria (np.: zwarcie, przepięcie) pojawi się po stronie obciążenia. Wzmacniacze operacyjne znajdujące się w torze prądowym (ch_1) licznika energii elektrycznej: A_{1i} oraz A_{2i} są układami scalonymi o programowalnym współczynniku wzmocnienia, które możemy wybrać zśród wartości: 16, 8, 4, 2 lub 1 V/V [1]. Duża różnica pomiędzy sąsiednimi wartościami wzmocnień uniemożliwia w takim obwodzie elektronicznym na wygenerowanie odpowiedniej stałej wzmocnienia co nie pozwala na pełne wykorzystanie dynamicznego zakresu przetwornika A/C_i pracującego w kanale wejściowym scalonego przetwornika energii elektrycznej. Analogowy tor napięciowy (ch_2) scalonego licznika energii elektrycznej ma dobrany stałowartościowy współczynnik wzmocnienia wzmacniacza A_u równy 2 V/V [1].

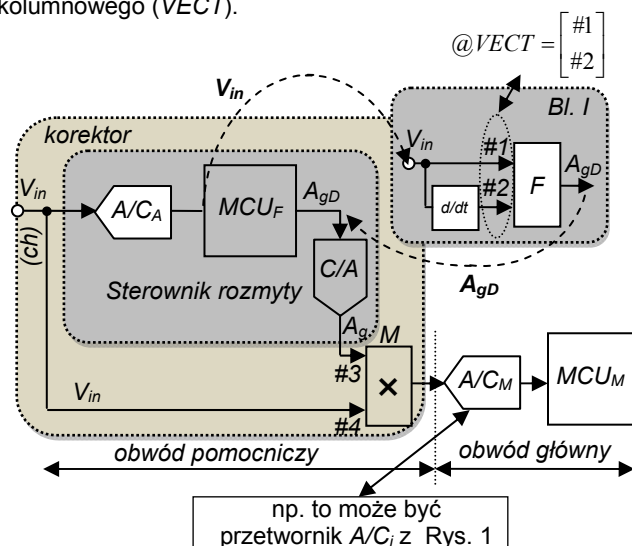
Autorzy artykułu w celu zachowania właściwości metrologicznych układów pomiarowych: prądu, napięcia, mocy i energii elektrycznej zaproponowali wykorzystanie układu inteligentnej korekcji, zapewniającego modyfikację stałej przetwarzania w sposób ciągły.

Struktura inteligentnego korektora stałej przetwarzania sygnału wejściowego przetwornika A/C

Ogólny schemat automatycznej kontroli wzmocnienia z wykorzystaniem wiedzy eksperta zaimplementowanej w sterowniku rozmytym został przedstawiony na rys. 2.

Inteligentny układ automatycznej kontroli wzmocnienia składa się z dwóch obwodów elektronicznych: pomocniczego oraz głównego. W skład obwodu pomocniczego wchodzi przetwornik analogowo-cyfrowy A/C_A, który wstępnie mierzy wartość szczytową sygnału wyjściowego (V_{in}) z przetwornika prądowego. Sygnał ten po przetworzeniu na postać cyfrową przekazywany jest za pomocą interfejsu komunikacyjnego do komórek pamięci danych RAM (ang. Random-Access Memory) systemu mikroprocesorowego - MCU_F. W przestrzeni pamięci systemu tego mikroprocesora zdefiniowany został kolumnowy wektor danych - VECT, który podawany jest na wejście zaimplementowanego w nim inteligentnego bloku (oznaczonego na rys. 2 symbolem - F) pracującego w strukturze typu MISO (ang. Multi Input Single Output) – o wejściu wektorowym i wyjściu skalarnym. Mikrokontroler - MCU_F dla danego odcinka czasowego $\Delta t = t_b - t_{(b-1)}$ (gdzie: t_b – jest czasem bieżącym natomiast $t_{(b-1)}$ – to czas z poprzedniego taktu procesora) oblicza wartość pochodnej (blok d/dt – rys. 2) wejściowego sygnału napięciowego (V_{in}), a następnie po przeliczeniu jej na stopnie geometryczne

wprowadzona zostaje do komórki wiersza #2 wektora kolumnowego (VECT).



Rys. 2. Schemat układu inteligentnego korektora automatycznej kontroli wzmocnienia, gdzie: @-odwołanie do komórki pamięci RAM, BL. I – blok sterownika rozmytego zaimplementowanego w systemie procesora MCU_F

W komórce wiersza #1 tego wektora zapisana zostaje wartość szczytowa próbki napięcia dla danej chwili czasowej t_b . Wektor w tej postaci trafia na wejście bloku sztucznej inteligencji (F). W tym bloku realizowany jest algorytm rozmyty generujący na jego wyjściu w ciągły sposób sygnał reprezentujący wartość żądanego wzmocnienia (A_{gD}) głównego toru pomiarowego (oznaczonego na Rys. 2 symbolem - ch). Wygenerowana stała przetwarzania jest konwertowana na postać analogową (A_g) przez wysoko-napięciowy przetwornik cyfrowo-analogowy C/A i w tej postaci podana zostaje na zacisk wejściowy (#3) mnożnika analogowego oznaczonego na schemacie z Rys.2 symbolem - M. Układ monolitycznego mnożnika realizuje iloczyn wartości szczytowej sygnału wyjściowego (V_{in}) z przetwornika wielkości mierzonej (np. indukcyjny przekładnik prądowy oznaczony na schemacie - Rys. 1 skrótem literowym - CT_{PH}) podłączonego do zacisku wejściowego (#4) analogowego mnożnika z inteligentnie wygenerowaną stałą przetwarzania (A_g). Wynik iloczynu zostaje przekazany na zaciski wejściowe układu A/C_M głównego obwodu elektronicznego. Wartość sygnału w tym obwodzie odpowiednio wzmocniona nie powinna przekraczać granicy równej 90% zakresu dynamicznego przetwornika A/C_M pracującego na jego wyjściu. Zmniejszenie zakresu zmian sygnału wejściowego tego przetwornika A/C_M o 10% wynika z faktu, że dla opadającego z dużą stromością sygnału wyjściowego (V_{in}) z przetwornika wejściowej wielkości mierzonej prądu lub napięcia (na tym etapie zostaje dobrana duża wartość wzmocnienia przez sterownik) dochodzi do nagłego wzrostu jej w czasie wykonywania algorytmu wyznaczającego stałą przetwarzania (jeszcze dla przypadku opadającego sygnału). W takiej sytuacji wzmocnienie z tą samą stałą przetwarzania sygnału lecz o innym kierunku nachylenia może spowodować dojście do nasycenia bloku przetwornika A/C_M i utraty informacji o wielkości mierzonej. Dzięki niewielkiemu obniżeniu pomiarowego zakresu analogowego obwodu głównego (zacisk wyjściowy układu korektora), korektor rozmyty można implementować przy wykorzystaniu różnych typów systemu mikroprocesora (szybkie procesory jak i wolniejsze).

Wyznaczenie odpowiedniej wartości wzmocnienia w systemie mikroprocesorowym za pomocą klasycznego sekwencyjnego algorytmu wymaga dużej wiedzy projektanta (inżynier procesu) na temat wszystkich zmiennych wchodzących w skład funkcji wzmocnienia wejściowego sygnału toru pomiarowego. Dokładny opis matematyczny ww. funkcji jest skomplikowany przez co możliwość szybkiego numerycznego wyznaczenia stałej przetwarzania wraz z wygenerowaniem sygnału sterującego pracą wzmacniacza operacyjnego jest operacją czasochłonną. Z tego względu autorzy artykułu zaproponowali do wyznaczenia wzmocnienia sygnału analogowego toru wejściowego urządzenia pomiarowego zastosowanie sterownika rozmytego bazującego na heurystycznej wiedzy eksperta przekazywanej do jego bazy danych za pomocą zestawu intuicyjnych reguł. Wiedza zawarta w tych regułach pozwala na łatwą interpretację parametrów projektowanego systemu korekcji wzmocnienia. Dodatkową zaletą sterowników rozmytych jest ich praca ciągła, dzięki czemu przebieg na wejściu przetwornika A/C_M jest gładki.

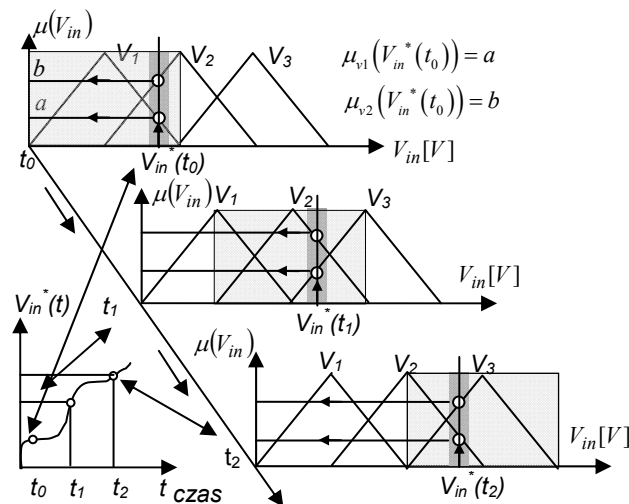
W układzie inteligentnego korektora automatycznej kontroli wzmocnienia ważnym parametrem, od którego zależy jakość przetwarzania sygnału wejściowego (V_{in}) na wyjściowy przebieg wzmocnienia (A_g) jest:

- odpowiedni dobór parametrów zastosowanych układów scalonych:
 - a. przetwornika analogowo-cyfrowego (A/C_A , A/C_M). Z tego względu autorzy artykułu wybrali konstrukcję przetworników A/C typu flash, które dokonują konwersję sygnału analogowego na cyfrowy w jednej operacji polegającej na porównaniu napięcia wejściowego (V_{in}) ze wszystkimi możliwymi poziomami kwantyzacji. Czas konwersji tego układu jest sumą reakcji jego komparatorów oraz czasu propagacji dekodera i wynosi ok. 100ns,
 - b. przetwornika C/A (cyfrowo-analogowego) – o wysokim napięciu referencyjnym w celu możliwości przekształcenia cyfrowej wartości reprezentującej żądane wzmocnienie wygenerowanej przez rozmyty sterownik (A_{gD}) na postać analogową (A_g) z zakresu od 0 do 60V,
- dobór analogowego mnożnika (M) - układ ten powinien cechować się dużym współczynnikiem SR (ang. slew rate), określającym maksymalną szybkości zmian napięcia na jego wyjściu,
- minimalizacja błędu powierzchni (ΔS) wejścia/wyjścia sterownika rozmytego zaimplementowanego w systemie mikroprocesorowym MCU_F . Sposób w jaki można zminimalizować błąd płaszczyzny sterownika został przedstawiony w dalszej części artykułu.

Sterownik rozmyty z wnioskowaniem typu Mamdani'ego pracujący w układzie automatycznej kontroli wzmocnienia

W układzie inteligentnej automatycznej kontroli wzmocnienia autorzy artykułu wykorzystali sterownik rozmyty z wnioskowaniem typu Mamdani'ego. Na wejście tego układu podawany jest kolumnowy wektor wejściowy $VECT$ zawierający w pierwszym wierszu wartość szczytową napięcia $V_{in}^*(t)$ (symbol w indeksie górnym zmiennej oznacza jej wartość ostrą) oraz w drugim jego pochodną. Pierwszym głównym blokiem składowym w strukturze ww. sterownika jest fuzyfikator realizujący operację rozmywania, polegającą na transformacji wartości rzeczywistej wprowadzonej do systemu rozmytego z zacisków wejściowych mikroprocesora (Rys. 2 - MCU_F) na wartość z dziedziny zbiorów rozmytych [4]. Na Rys. 3 przedstawiono graficznie proces rozmywania ostrej wartości

wejściowej ($V_{in}^*(t)$) sterownika rozmytego korektora wzmocnienia względem jednego jego wejścia (#1 - Rys. 2) w chwilach czasowych: t_0 , t_1 , t_2 .



Rys. 3. Proces rozmycia wartości ostrej napięcia $V_{in}^*(t)$ dla wejścia #1 sterownika rozmytego układu automatycznej korekcji wzmocnienia przedstawionego na Rys. 2 [5]

Z wykresu przedstawionego na Rys. 3 można odczytać dla wybranej chwili czasowej t_0 i ostrej wartości wejściowej sterownika $V_{in}^*(t_0)$, wynik wartości funkcji przynależności $\mu_{v1}(V_{in}^*(t_0))=a$ oraz $\mu_{v2}(V_{in}^*(t_0))=b$ do zbiorów rozmytych: V_1 i V_2 .

Kolejnym istotnym blokiem składowym struktury sterownika rozmytego jest jego baza danych, która zawiera zbiór rozmytych reguł typu *jeżeli-to*. W układzie inteligentnego korektora wykorzystano złożone reguły połączone spójnikiem logicznym \wedge (koniunkcja), które można zapisać zależnością [6]:

$$(1) \quad \left\{ R^{(i)} \right\}_{i=1}^L = \left\{ \text{jeżeli} \left(\bigwedge_{n=1}^N X_n \text{ jest } V_n^{(i)} \right), \text{to } A_g \text{ jest } A^{(i)} \right\}_{i=1}^L$$

gdzie: $R^{(i)}$ - i -ta reguła, L - liczba wszystkich reguł w bazie sterownika, X_n - wejściowe zmienne lingwistyczne sterownika rozmytego (X_1 - reprezentuje wartość szczytową napięcia V_{in} natomiast X_2 - jego pochodną), A_g reprezentuje wartość żądanego wzmocnienia, N - liczba zmiennych wejściowych sterownika rozmytego (dla rozpatrywanego układu $N=2$), Y - wyjściowe zmienne lingwistyczne sterownika rozmytego, $V_n^{(i)}$, $A^{(i)}$ - wartości lingwistyczne zdefiniowane odpowiednio na przestrzeni wejściowej X i wyjściowej Y , p - przesłanka reguły związana z wejściem (we) sytemu rozmytego, k - konkluzja reguły związana z wyjściem (wy) sytemu rozmytego.

Reguły określone wzorem (1) są charakterystyczne dla systemu o budowie typu MISO (ang. Multi-Input-Single-Output), na którego wejście wprowadza się wektor danych, a odpowiedzią na wyjściu jest wartość skalarna. Rolą projektanta systemu rozmytego (eksperta) jest dokładne określenie reguł, które definiują punkt podpory płaszczyzny odwzorowującej działanie tego sterownika.

W celu zapewnienia wysokiej precyzji wygenerowania wartości wyjściowej (A_{gD}) przez inteligentny układ regułowy jego baza danych powinna być kompletna tzn. spełnić nierówność określoną zależnością [6]:

$$(2) \quad \forall_{x_N \in X_N} \exists_{1 \leq i \leq L} \mu_{A^{(i)}}(x_N) > 0$$

gdzie: N - liczba wejść sterownika, x_N - zmienne wejściowe sterownika rozmytego, X_N - przestrzeń wejściowa, $\mu_{AN}(x_N)$ - funkcja przynależności N -tej zmiennej wejściowej x_N do zbioru rozmytego A_N

Z zależności (2) wynika, że dla każdej wartości zmiennej wejściowej sterownika rozmytego (x_1 - wartość szczytowa oraz x_2 - jej pochodna) co najmniej jedna reguła (opisana zal. (1)) ma być aktywna oznacza to, że funkcja przynależności dla przesłanki reguły rozmytej (część reguły - p zal. (1)) jest większa od zera dla rozważanych wartości wejść inteligentnego układu [4, 6]. Innym istotnym parametrem określającym jakość bazy sterownika rozmytego jest jej zgodność polegająca na braku sformułowanych w niej reguł o identycznych przesłankach i różnych konkluzjach (część reguły - k zal. (1)) [4, 6]. Baza reguł sterownika spełniająca powyższe założenia pozwala na wygenerowanie przez niego odpowiednio wysokiej precyzji siatki podziału wejścia/wyjścia przecinającej się ortogonalnie. Dokładny opis matematyczny wyznaczenia wartości wyjściowej ze sterownika rozmytego przedstawiony jest w [4, 7, 8]. W celu zobrazowania procesu wygenerowania inteligentnej stałej przetwarzania A_{gD} w danej chwili czasowej t w regułowym sterowniku rozmytym układzie korektora wzmocnienia posłużą dwie przykładowe reguły rozmyte określone zależnością [4, 6, 8]:

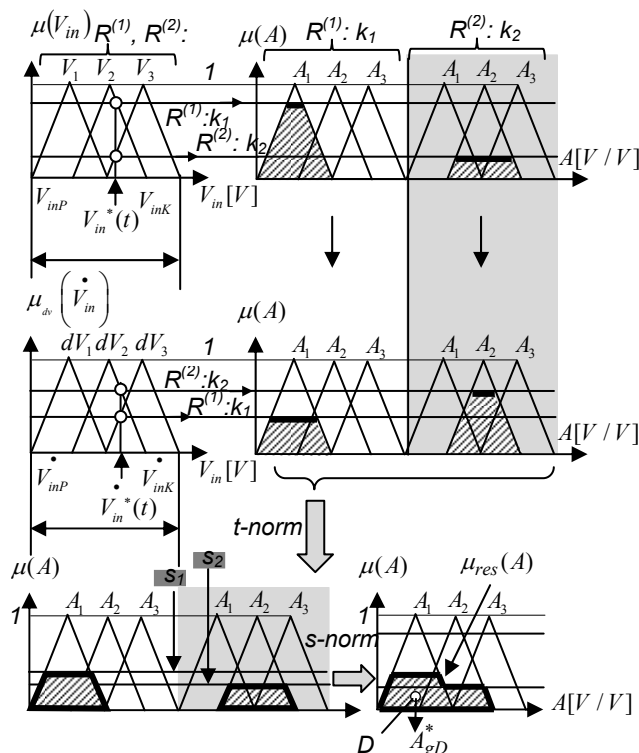
$$(3) \quad \begin{aligned} R^{(1)} : & \text{JEŻELI } \left(\overbrace{V_{in}(t) \text{ jest } V_2}^{p_1} \right) \& \left(\overbrace{\dot{V}_{in}(t) \text{ jest } dV_2}^{p_2} \right), \\ & \text{to } \left(\overbrace{A(t) \text{ jest } A_1}^{k_1} \right), \\ R^{(2)} : & \text{JEŻELI } \left(\overbrace{V_{in}(t) \text{ jest } V_3}^{p_2} \right) \& \left(\overbrace{\dot{V}_{in}(t) \text{ jest } dV_2}^{p_2} \right), \\ & \text{to } \left(\overbrace{A(t) \text{ jest } A_2}^{k_2} \right) \end{aligned}$$

gdzie: $\&$ - operator koniunkcji \wedge ; V, dV, A - wartości lingwistyczne, $\dot{\bullet}$ - nad zmienną oznacza symbol pochodnej

Na wejściowy blok sterownika Mamdani'ego zostają wprowadzone sygnały $V_{in}(t)$ oraz jego pochodna gdzie zostają odpowiednio przyporządkowane do zdefiniowanych przez eksperta zbiorów rozmytych jego przestrzeni wejściowej ($V_1, \dots, V_2, dV_1, \dots, dV_2$) - rys. 4. Na tym etapie procesu rozmywania inteligentny sterownik ocenia złożone przesłanki koniunkcyjne (dwie proste przesłanki połączone operatorem logicznym $\&$, zal. (3) - część - p_1 oraz p_2) reguł rozmytych (zal. (3)) pod kątem stopnia ich spełnienia (prawdziwości), które zostają przypisane do zmiennej s . Stopień ten może przyjąć wartość pomiędzy 0 a 1 przy czym 0 oznaczać będzie brak aktywizacji reguł do procesu wnioskowania. Czym większa wartość zmiennej s przesłanki danej reguły, tym większy jest jej udział w wyznaczeniu wynikowego wniosku [4].

Stopień spełnienia przesłanek reguł: $R^{(1)}, R^{(2)}$ określonych zal. (3) został wyznaczony przy wykorzystaniu operatora t-normy typu MIN i dla rozpatrywanego przypadku wyniósł odpowiednio s_1 oraz s_2 (linie poziome oznaczone na rys. 4). Wartości te wezmą udział w dalszej części wnioskowania rozmytego. Ostatnim krokiem inferencji jest wyznaczenie wynikowego zbioru konkluzji - $\mu_{res}(A)$ zdefiniowanego na podstawowym rozmytym zbiorze wyjściowym A przy wykorzystaniu operatora s-normy typu MAX . W ten sposób została otrzymana operacja rozmytego złożenia relacji (ang. fuzzy composition) typu $MAX-MIN$ w układzie inteligentnego korektora wzmocnienia. Na wyjściu

procesu rozmytego wnioskowania znajduje się blok wyostrzania (defuzyfikacji) danej wyjściowej ze sterownika. Autorzy artykułu zastosowali metodę środka ciężkości - COG (ang. Center of Gravity), która wyznaczy ostry sygnał A_{gD} reprezentujący wyjście systemu sterownika rozmytego.



Rys. 4. Zobrazowany proces wnioskowania rozmytego Mamdani'ego przy wykorzystaniu inferencji typu: $MAX-MIN$ dla dwóch wejść i jednego wyjścia oraz dwóch reguł sterownika rozmytego, gdzie: D - środek ciężkości wynikowego zbioru $\mu_{res}(A)$ [5]

Minimalizacja błędu płaszczyzny sterownika rozmytego o wnioskowaniu typu Mamdani'ego

Poprawnie generowane wyników wyjściowych z inteligentnego korektora wzmocnienia jest możliwe do uzyskania poprzez wykonywanie wielu eksperymentów, które przeprowadza ekspert. Badania te polegają na sprawdzeniu odpowiedzi sterownika rozmytego na zadane sygnały wejściowe przy różnych wybranych parametrach sterownika takich jak:

1. rodzaj użytych funkcji przynależności $\mu_A(x)$ - elementów przestrzeni wejściowej oraz wyjściowej do zbiorów rozmytych:

1.1. funkcja trójkątna - do zdefiniowania jej w systemie rozmytym potrzebne są jedynie współrzędne punktów narożnych co jest dużą jej zaletą [4]. Odpowiedni rozstaw rdzeni funkcji przynależności (jest to taki punkt funkcji przynależności, w którym stopień przynależności wynosi 1) wzdłuż osi sygnałów wejściowych (podstawowa przestrzeń wejściowa - X) wpływa znacząco na dokładność modelu sterownika rozmytego. Wg. autorów artykułu najlepszym narzędziem do określenia położenia rdzenia danej funkcji przynależności jest analiza skupień grup danych wejściowych o podobnych parametrach metodą k-średnich. Wynikiem tego algorytmu dla sygnału wejściowego V_{in} oraz jego pochodnej są wyznaczone grupy reprezentantów wraz z środkami skupień. W określonych za pomocą tej metody centralnych punktach skupisk danych wejściowych sterownika należy lokować rdzenie funkcji przynależności sterownika rozmytego;

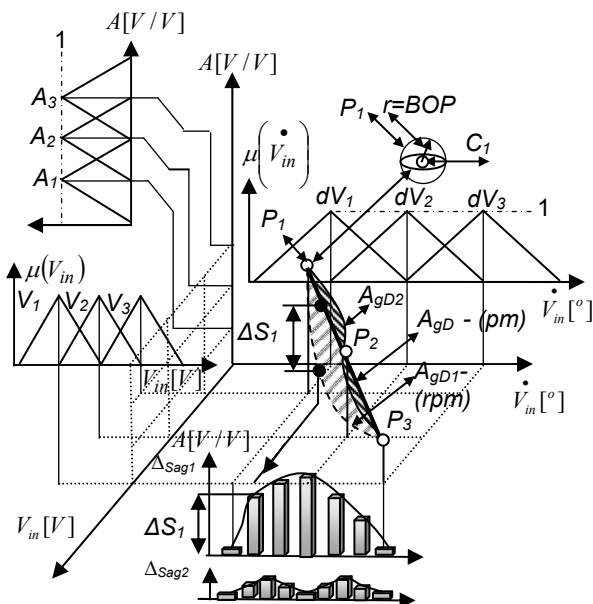
1.2. funkcja Gaussa- jest elastyczna w implementacji po zmianie jej parametru może przybrać kształt funkcji np. trójkątnej. Główną jej zaletą jest możliwość wygenerowania przez sterownik rozmyty gładkich hiperpowierzchni [4]. Rdzenie funkcji przynależności należy ustawić wg. algorytmu podanego w pkt. 1.1.

2. rodzaju użytego operatora iloczynu logicznego w implikacji Mamdani'ego:

2.1 *MIN-MAX* - główną zaletą operatora *MIN* służącego do połączenia dwóch zbiorów rozmytych (stopień spełnienia koniunkcyjnej przesłanki) jest duża jego obliczeniowa szybkość co pozwala na zmniejszenie nakładu obliczeń w jednostce mikroprocesora. Powierzchnia sterownika rozmytego wykorzystującego ten operator jest mniej gładka co jest jego główną wadą [4]. Drugim członem w implikacji jest operator s-normy typu *MAX* (suma logiczna) służący do agregacji wyjścia otrzymanego dla każdej reguły (wniosków). Działanie operatora *MIN-MAX* zostało przedstawione na Rys. 4.

2.2 *PROD-MAX* - operator *PROD* realizuje iloczyn poprzedników (np. część - p_1 : p_{11} z p_{12} reguły określonej zal. (3)). Zaletą operatora t-normy typu *PROD* służący do połączenia dwóch zbiorów rozmytych pozwala na modelowanie gładkiej powierzchni systemu rozmytego [4].

Na Rys. 5 przedstawiono trzy trójwymiarowe funkcje: A_{gd} , A_{gd1} , A_{gd2} łączącą punkty: P_1 , P_2 , P_3 podpory płaszczyzny odwzorowującej działanie sterownika rozmytego o strukturze typu *MISO*. Kształt tych funkcji uzależniony jest od użytych parametrów w sterowniku rozmytym (podane w pkt. 1 oraz pkt. 2). W obszarze pomiędzy punktami podpory płaszczyzny wejścia/wyjścia sterownika rozmytego wartość wygenerowana wzmocnienia nie musi się pokrywać z modelową linią prostą pm (funkcja: A_{gDm}) łączące te punkty. Tak wygenerowana przez sterownik funkcja (np. A_{gD1}) tworzy rzeczywistą powierzchnię systemu (rps).



Rys. 5. Rodzina funkcji hiperpowierzchni wyjścia/wyjścia sterownika rozmytego pracującego w strukturze typu z dwoma wejściami (V_{in} oraz pochodna tego sygnału przeliczona na stopnie geometryczne) i z jednym skalarnym wyjściem reprezentującym żądane wzmocnienie zależna od użytych funkcji przynależności i parametrów w sterowniku rozmytym

Różnicę pomiędzy systemem rps (A_{gD1}), a pm (A_{gDm}) wyznacza jego błąd ΔS . Błąd ten można wyznaczyć na podstawie zależności [9]:

$$(4) \quad \Delta S = \int_{V_{inP}^*}^{V_{inK}^*} \int_{V_{inP}^*}^{V_{inK}^*} |A_{gD1} - A_{gDm}| dV_{in} d\dot{V}_{in}$$

gdzie: oznaczenia całek to zakresy zmiennych wejściowych (napięcia wejściowego V_{in} oraz jego pochodnej) gdzie P - w indeksie dolnym oznacza początek natomiast K - koniec (zaznaczone na Rys. 4).

Każda z funkcji: A_{gD} , A_{gD1} , A_{gD2} powstała w oparciu o inny operator implikacji (np.: *MIN-MAX* - pkt. 2.1, *PROD-MAX* - pkt. 2.2), typu funkcji przynależności (pkt.: 1.1, 1.2) w rozpatrywanym sterowniku rozmytym. Powierzchnią modelu przedstawioną na Rys. 5 – A_{gD} jest bazowa trójwymiarowa funkcja, do której chcemy się zbliżyć. Przykładowy kształt funkcji A_{gD1} uzyskamy przy użyciu funkcji trójkątnych i operatora t-normy typu *MIN* (klasyczne zestawienie parametrów). Takie skonfigurowanie sterownika może wprowadzić duży błąd płaszczyzny ΔS_1 (różnica pomiędzy A_{gD} a A_{gD1} przedstawiona na Rys. 5). Wartość tego błędu można wyznaczyć na podstawie zal. (4). Przy wykorzystaniu funkcji przynależności typu Gaussa oraz operatora t-normy typu *PROD* można otrzymać kształt funkcji zbliżony do A_{gD2} , która będzie cechować się mniejszym błędem ΔS_2 niż w przypadku wygenerowanej przez sterownik rozmyty funkcji A_{gD1} .

Odpowiednie ułożeniem rdzeni funkcji przynależności wzdłuż osi płaszczyzny wejścia/wyjścia sterownika rozmytego oraz dobór jego parametrów wpływa w sposób jakościowy na dokładność układu korektora wzmocnienia wejściowego sygnału toru analogowego przetwornika A/C przez zmniejszenie jego błędu płaszczyznowego.

Na Rys. 5 zaznaczono punkt otoczony sferą *BOP* (Bliskie Otoczenie Punktu podpory płaszczyzny) wynikający z lokalnej właściwości reguły definiującej niewielkie otoczenie (promień - r), w której mogą znajdować się współrzędne punktów płaszczyzny wejścia/wyjścia sterownika rozmytego [9].

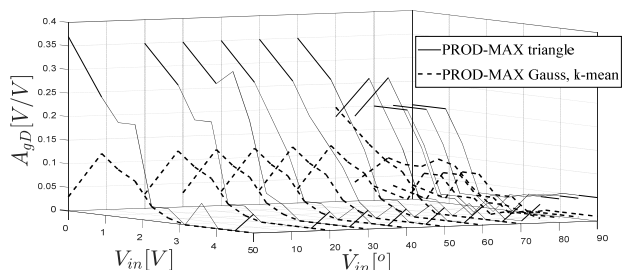
W celu jakościowej analizy cech proponowanej procedury rozmytej o zastosowanych parametrach klasycznych oraz odpowiednio strojonych jako element analogowego toru przetwarzania sygnału wejściowego z przetwornika prądu lub napięcia został utworzony symulacyjny model w programie Matlab/Simulink. Do oceny błędów tych sterowników posłużyła zal. (4). Błąd ten przekłada się w sposób znaczący na jakość sterowania w układzie korekcyjnym stałej przetwarzania wykorzystującym intuicyjne reguły sterowania podane przez eksperta. Klasyczna metoda kreowania płaszczyzny wejścia/wyjścia sterownika rozmytego wykorzystuje trójkątne funkcje przynależności w podstawowej przestrzeni wejścia (V_{in} oraz jego pochodna) oraz wyjścia (A) o równomiernym zagęszczeniu jej siatki podziału. Na Rys. 6 przedstawiono otrzymane na drodze symulacji komputerowej błędy powierzchniowe sterownika rozmytego względem jego modelu (pm) wygenerowane dla jego hiperpowierzchni wyjścia/wyjścia:

- przy użyciu funkcji trójkątnych oraz mechanizmu inferencji (wnioskowania) typu *PROD-MAX*,
- przy użyciu funkcji Gaussa oraz mechanizmu inferencji (wnioskowania) typu *PROD-MAX* o rdzeniach odpowiednio przesuniętych wzdłuż jego osi wejściowych.

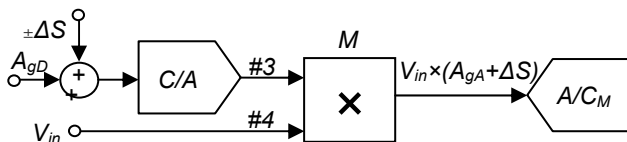
Wartość błędu płaszczyzny ΔS przedstawionej na rys. 6 nie jest stała w całej przestrzeni rozważań sterownika rozmytego. Niewielka wartość tego błędu (0.25 V/V) bierze udział w procesie iloczynu w mnożniku analogowym pracującym w układzie inteligentnej korekcji (scalony element oznaczony symbolem - M na rys. 2), którą należy

dodać do założonej stałej przetwarzania (A_{gD}) zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 7.

Wynik iloczynu (wartość szczytową sygnału wejściowego przetwornika A/C_M) z nie zminimalizowanym błędem płaszczyzny (ΔS) sposób znaczący wpływa dokładność pomiaru prądu lub napięcia w inteligentnym układzie korekcji stałej przetwarzania w szczególności w pomiarach dynamicznych.



Rys. 6. Rodzina błędów powierzchni wejścia-wyjścia sterownika rozmytego pracującego w układzie automatycznej korekcji wzmacnienia



Rys. 7 Rzeczywisty tor wejściowy mnożnika pracującego w układzie automatycznej kontroli wzmacnienia

Podsumowanie

W artykule został przedstawiony układ inteligentnej korekcji wzmacnienia sygnałów wejściowych torów pomiarowych zawierających przetwornik A/C . Autorzy artykułu przedstawili główne punkty jakie należy

przeanalizować w czasie projektowania sterownika rozmytego. Odpowiedni dobór parametrów przez eksperta w fazie projektowania układu inteligentnego pozwala na zmniejszenie jego błędu powierzchni. Wartość tego błędu wpływa na wynik iloczynu sygnałów wejściowego toru pomiarowego z inteligentną stałą przetwarzania. Odpowiednie poziomy sygnału wejściowego przetwornika zapewnia pomiar z wysoką rozdzielczością.

Autorzy: dr inż. Bartosz Dominikowski, Politechnika Łódzka, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: bartosz.dominikowski@yahoo.com, bartosz.dominiukowski@p.lodz.pl; dr hab. inż. Krzysztof Pacholski, Politechnika Łódzka, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: krzysztof.pacholski@p.lodz.pl; mgr inż. Piotr Woźniak, Politechnika Łódzka, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: piotr.wozniak.1@p.lodz.pl

LITERATURA

- [1] Kester W., Przetworniki A/C i C/A. Teoria i praktyka, BTC (2012)
- [2] Maloberti F., Przetworniki danych, WKiŁ (2010)
- [3] Energy Metering IC with On-Chip Fault and Missing Neutral Detection, Analog Devices (2004), 13-14
- [4] Piegat A., Fuzzy Modeling and Control. Springer (2001)
- [5] Chmielowski Z.W., Fuzzy Control in Environmental Engineering, Springer (2015)
- [6] Łęski J., Systemy neuronowo-rozmyte. WNT (2008)
- [7] Rutkowski L., Metody i techniki sztucznej inteligencji, PWN (2012)
- [8] Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M., An Introduction to Fuzzy Control, Springer (1993)
- [9] Piegat A., Olchowy M., Does an Optimal Form of an Expert Fuzzy Model Exist?, *Artificial Intelligence and Soft Computing*, Springer (2010), Part I, 175-184