

INTELIWENTNA KOREKCJA WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNYCH TRAKCYJNYCH LICZNIKÓW ENERGII ELEKTRYCZNEJ

W artykule zaprezentowano możliwość wykorzystania sterownika rozmytego do korekcji właściwości metrologicznych trakcyjnego licznika energii elektrycznej. Zaprojektowany korektor umożliwia w sposób inteligentny modyfikację stałej przetwarzania wejściowej niskonapięciowej części toru prądowego licznika energii elektrycznej.

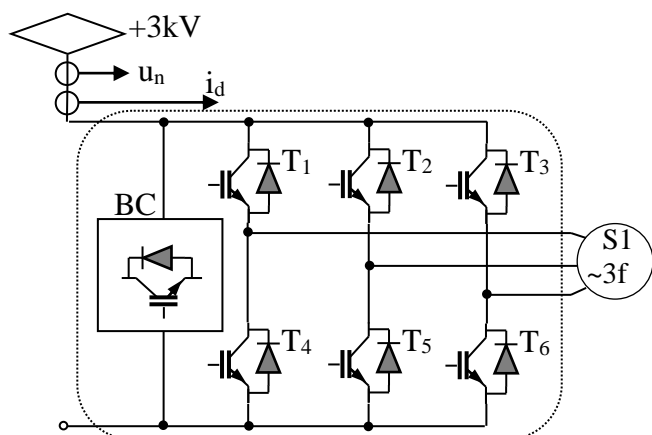
WSTĘP

W oparciu o Polską Normę PN-EN 50463-2: "Zastosowania kolejowe - Pomiar energii na pokładzie pociągu", powołanej przez CENELC (fr. Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki) w 2013 roku, zostały zaprojektowane urządzenia prądu stałego służące do rejestracji energii pobranej przez elektryczne zestawy trakcyjne [5, 6, 7]. Koszty za zużyta energię są istotne w budżecie każdego przewoźnika kolejowego, więc dokładność jej wyznaczenia jest bardzo ważna.

Autorzy referatu w celu określenia zakresu zmienności elektrycznych wielkości wejściowych licznika energii, stworzyli komputerowy model (w pakiecie obliczeniowym Matlab/Simulink) umożliwiający symulację ruchu zmodernizowanego zespołu trakcyjnego na trasie przewozowej uwzględniający jego: rozruch, jazdę z ustaloną prędkością i przyspieszenie oraz hamowanie rekuperacyjne.

Model składu kolejowego powstał w oparciu o dane katalogowe elektrycznych podzespołów napędowych, których głównymi składowymi są:

- napięciowy falownik FT-300-3000 firmy Medcom (mostkowy składający się z sześciu zaworów półprzewodnikowych) o schemacie przedstawionym na Rys. 1. [9, 10],



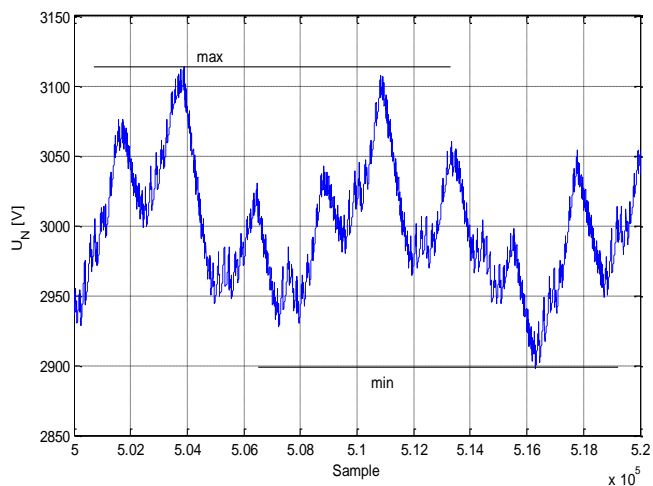
Rys. 1. Schemat trakcyjnego falownika napięcia z umiejscowionymi punktami pomiarowymi prądu (i_d) i napięcia (u_n), gdzie: T_1, \dots, T_6 - klucze półprzewodnikowe mocy, $S1$ - indukcyjny silnik napędowy, BC - blok czopera [10]

- asynchroniczne silniki trakcyjne typu LK-450X6 [8, 11],
- obwody pomocnicze (np. grzewcze),
- sieć trakcyjna OLC (ang. Overhead Contact Line).

Wejściowe przetworniki pomiarowe prądu i napięcia licznika energii podłączone są zaciskami strony wysokonapięciowej (pierwotnej) w miejscach występowania:

- napięcia zasilającego elektrowóz,
- prądu w głównym obwodzie zasilania elektrowozu.

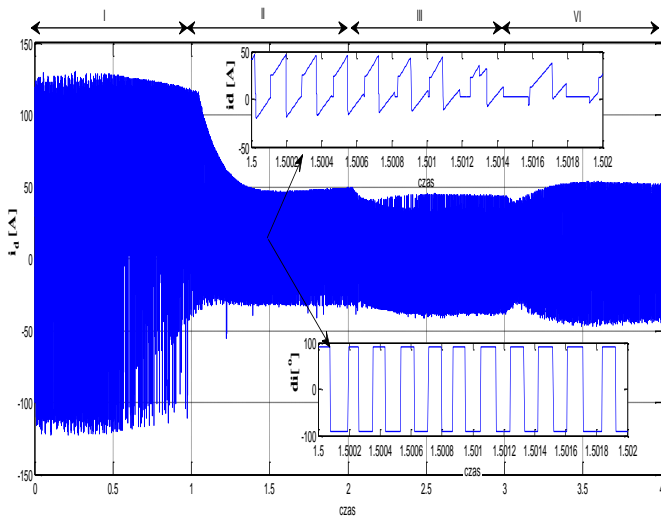
Z przeprowadzonej analizy wyników badań komputerowych obciążonych falowników trakcyjnych wynika, że napięcie linii zasilającej w niewielkim zakresie zmienia się w stosunku do wartości znamionowej $U_N=3kV$. Przebieg napięcia obciążonej linii jezdnej OLC przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Przebieg napięcia u_n obciążonej linii jezdnej OLC mierzonego na dolnym przyłączu bieguna wyłącznika szybkiego elektrowozu, gdzie: max , min - oznaczają maksymalną i minimalną zarejestrowaną wartość napięcia [20]

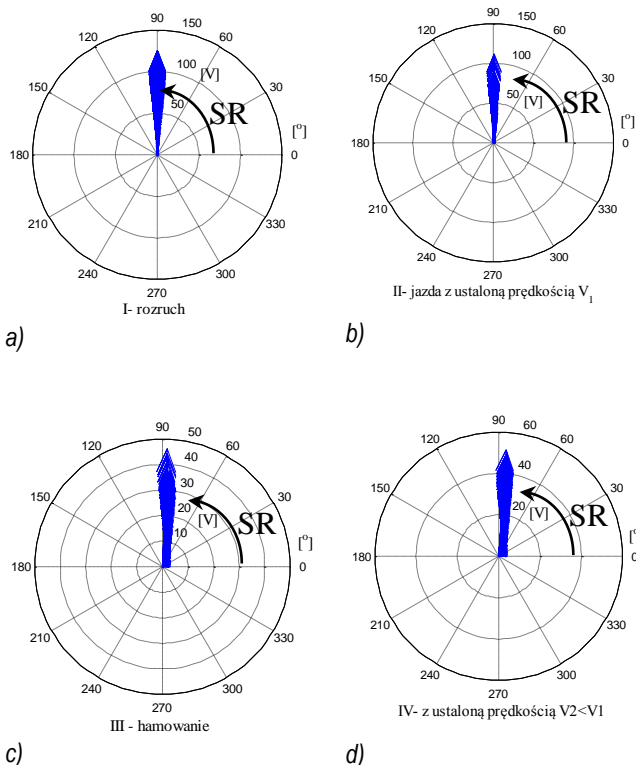
Ze względu na małą zmienność wartości szczytowej napięcia obciążonej linii jezdnej (Rys. 3), autorzy zastosowali po stronie niskonapięciowej licznika energii na wejściu kanału napięciowego precyzyjny wzmacniacz operacyjny o stałym wzmacnieniu.

Wartość prądu płynącego w głównym obwodzie elektrowozu zależna jest od tego, po jakim terenie i z jaką prędkością porusza się pojazd szynowy. Rys. 3 przedstawia zmiany wartości szczytowej prądu tego falownika w zależności od rodzaju ruchu zestawu kolejowego.



Rys. 3. Przebieg prądu i_d w obwodzie napięcia stałego DC zasilającego trakcyjny falownik, podzielony na odcinki czasowe odpowiadające: I- rozruchowi, II- jeździe z ustaloną prędkością v_1 , III - hamowaniu, IV- jeździe z ustaloną prędkością $v_2 < v_1$, zapis di na osi rzędnych jest określa szybkość zarastania sygnału, wyrażoną w stopniach geometrycznych [19]

Największa wartość szczytowa prądu i_d zasilającego elektrowóz (Rys. 3) odpowiada rozruchowi - odcinek czasowy I, natomiast najmniejszą uzyskujemy przy hamowaniu - odcinek czasowy III. Przebieg czasowy z Rys. 3 jest sygnałem szybkozmiennym, którego maksymalna wartości szybkość narastania określona zależnością $SR = |di_d(t)/dt|_{max}$ nie przekracza $420 \text{ A}/\mu\text{s}$. Współczynnik charakteryzujący szybkość zmian prądu obciążenia wyrażony w stopniach geometrycznych przedstawiono na Rys. 4 wraz z podziałem na profile jazdy taboru szynowego.



Rys. 4. Wektory wartości chwilowej spróbowanego prądu $|i_d|$ (Rys. 3) w obszarach pracy EZT (Elektrycznego Zespołu Trakcyjnego): a) rozruchu, b) jazdy z ustaloną prędkością, c) hamowania (odcinek III – Rys. 3), d) przyspieszenia (odcinek VI – Rys. 3)

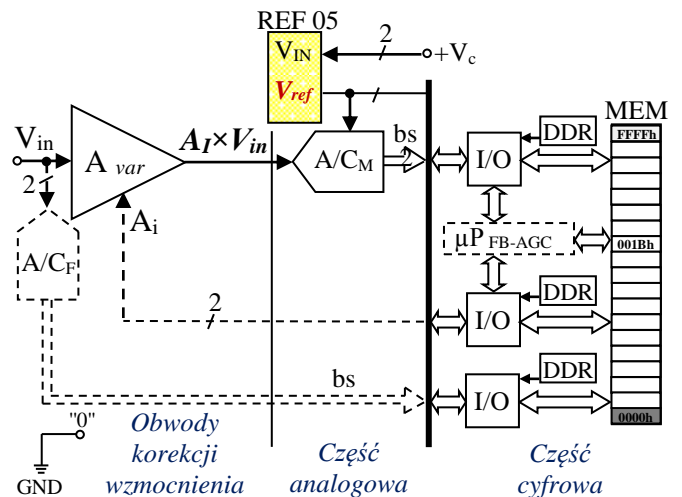
Wykresy wektorowe z Rys. 4 przedstawiają rodzinę wektorów o współrzędnych $[|i_d(n \times T_s)| \ T_s(n)]$ spróbowanego przebiegu z Rys. 3, gdzie: n - kolejne chwile czasowe w zadanych odstępach T_s (okres próbkowania).

Jak widać z Rys. 4 dynamika narastania zarejestrowanego przebiegu głównego prądu obciążenia elektrowozu i_d jest zależna od stanu pracy zestawu kolejkowego i oscyluje pomiędzy wartościami $70 - 88^\circ$ określającymi jego nachylenie w stosunku do osi czasu.

Główny prąd obciążenia i_d elektrowozu (Rys. 3) przeniesiony na stronę wtórną przetwornika prądowego jest niskonapięciowym sygnałem wyjściowym toru prądowego pokładowego licznika, który zmienia się w całym zakresie napięcia referencyjnego przetwornika analogowo-cyfrowego (A/C) tego toru. Błąd pomiaru energii elektrycznej jest odwrotnie proporcjonalny do wartości szczytowej wejściowego sygnału przetwornika A/C pracującego w torze prądowym licznika [1]. Z tego względu stała przetwarzania w torze prądowym powinna zmieniać się w sposób ciągły tak, aby na wejściu przetwornika analogowo-cyfrowego tego toru uzyskać sygnał o wartości zbliżonej do napięcia referencyjnego układu A/C. Do realizacji ciągłej zmiany stałej przetwarzania autorzy zmodyfikowali klasyczny układ korekcji przez zastosowanie sterownika rozmytego. Szczegółowa zasada dziania ww. sterownika rozmytego pracującego w układzie korekcji wzmacnienia przedstawiono poniżej.

1. AUTOMATYCZNA KONTROLA WZMOCNIENA

W literaturze [1, 3] przedstawiono model systemu pomiarowego pozwalającego na realizację zadania wzmacnienia wejściowego sygnału przetwornika A/C licznika trakcyjnego tak, aby został wykorzystany cały jego zakres pomiarowy. W celu dobrania odpowiedniej wartości wzmacnienia korektor wykorzystuje „procedurę adaptacji parametrów układu, zależnych od odpowiednich przetwarzanych sygnałów, przy zastosowaniu np. wzmacniacza PGA (ang. Programmable Gain Amplifier)”. Realizacja tego układu została przedstawiona na Rys. 5.



Rys. 5. Architektura układu AGC (ang. Automatic Gain Control) - automatycznej kontroli wzmacnienia typu feedback toru prądowego licznika (sterowanie z informacją zwrotną), bs- (bit stream) - przepływ bitów, I/O - obwody wejścia/wyjścia, DDR (ang. Data Direction Register) - rejestr kierunkowy, MEM - pamięć, REF05 - źródło napięcia odniesienia, A/C_M - przetwornik A/C kanału prądowego licznika energii elektrycznej, A/C_F - przetwornika A/C obwodu pomocniczego korektora, μP_{FB-AGC} - sterownik rozmyty [3]

Procedura wyznaczenia żądanej wartości wzmacnienia A_i , analogowego sygnału wyjściowego toru prądowego licznika, opiera się na pomiarze przez układ pomocniczy (tor pomiarowy zawierający układ A/C_F na Rys. 5) wartości szczytowej napięcia wejściowego V_{in} i wpisaniem jej do pamięci wewnętrznej mikroprocesora (MEM). Na podstawie tej informacji, system cyfrowy zawierający cyfrową jednostkę obliczeniową (μP_{FB-AGC}) wyznacza wartość wzmacnienia (A_i) wzmacniacza sterowanego cyfrowo typu PGA lub VCA (ang. Voltage Controlled Amplifier) tak, aby został wykorzystany cały zakres przetwornika A/C_M kanału prądowego licznika [1].

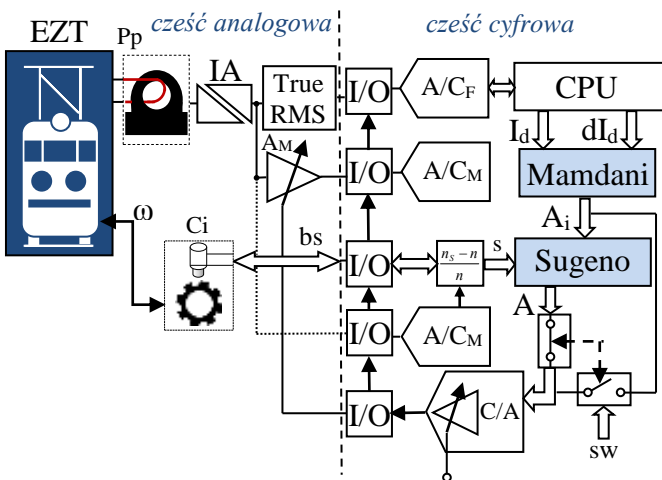
2. STEROWNIK ROZMYTY TYPU MAMDANI

Autrzy referatu wykorzystali w układzie korektora stałej przetwarzania wejściowego niskonapięciowego sygnału prądowego toru licznika energii dwa sterowniki rozmyte połączone ze sobą w sposób kaskadowy zaimplementowane w układzie mikroprocesora μP_{FB-AGC} (Rys. 5) [13]. Działanie tego systemu rozmytego oparte jest o modele rozmyte typu:

- Mamdaniego,
- Takagi-Sugeno.

Oba sterowniki pracują w konfiguracji układu dwuwejściowego MISO (ang. Multi Input Single Output) o pojedynczym skalarnym wyjściu. Połączenie kaskadowe tworzy układ bardziej elastycznym, przy braku wielkości wejściowej końcowego sterownika rozmytego można go wyłączyć z układu korekcji.

Na Rys. 6 przedstawiono sposób połączenia sterowników rozmytych w systemie wyznaczania wzmacnienia toru prądowego licznika energii.



Rys. 6. Schemat blokowy systemu rozmytego wyznaczającego wzmacnienie na podstawie wektora wejściowego reprezentującego odpowiednio: I_d - wartość skuteczna prądu, dI_d/dt - stałą narastania, s - poślizg, A_i - A-wyjścia modelu Mamdani'ego oraz TSK, gdzie: C_i - czujnik indukcyjny do pomiaru prędkości obrotowej wirnika ω , P_p - przetwornik prądu, I_A - wzmacniacz izolacyjny, True RMS - przetwornik wartości skutecznej, sw - przelazcznik

Sygnałami wejściowymi sterownika rozmytego Mamdani'ego są:

- wartość skuteczna sygnału wejściowego toru prądowego licznika,
- prędkość narastania wartości skutecznej sygnału wejściowego toru prądowego licznika.

Sygnałami wejściowymi układu logicznego z wnioskowaniem TSK są:

- wartość poślizgu prędkości obrotowej indukcyjnych elektrowozu określona zależnością:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1)$$

gdzie: n_s - prędkość wirowania pola magnetycznego wynikającą z liczby par biegunów i częstotliwości prądu zasilającego stojan silnika, n - prędkość obrotowa wirnika

- wzmacnienie A_i ustalone przez sterownik rozmyty Mamdani'ego.

Dzięki separacji systemu rozmytego na dwa oddzielne sterowniki zapis reguł działania systemu jest bardziej zbliżony do języka naturalnego, nie powodując tym znacznego skomplikowania opisu procesu wyznaczenia wzmacnienia toru prądowego. Dużą zaletą połączenia kaskadowego sterowników jest uniknięcie zjawiska wielowymiarowości [13].

2.1. Sterownik rozmyty wykorzystujący wnioskowanie typu Mamdaniego uwzględniający zasadę rozszerzania typu sup-min

Rozmyty sterownik Mamdaniego prezentowany w artykule wykorzystuje t-normę typu MIN ($\mu_{A \wedge B}(X) = \min(\mu_A(X), \mu_B(X)) = T(\mu_A(X), \mu_B(X))$). Reguły działania systemu rozmytego Mamdaniego określone są zależnościami (2, 3) [13]:

$$R^{(1)}: \text{JEŻELI } x \text{ jest } A_1 \text{ I } y \text{ jest } B_1 \text{ TO } z \text{ jest } C_1 \quad (2)$$

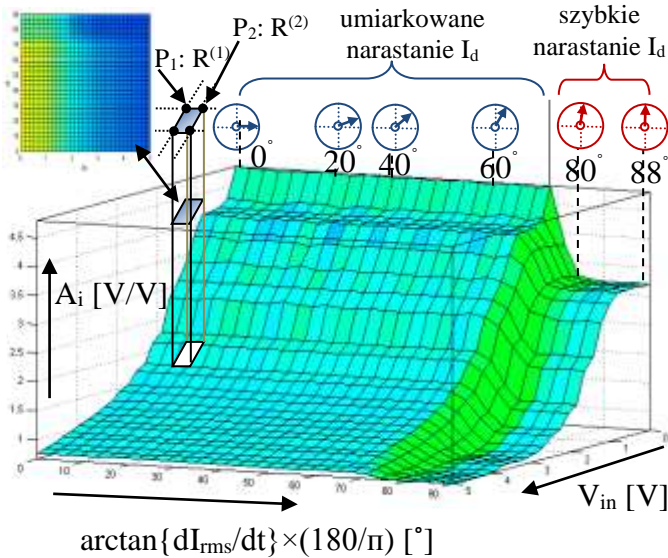
oraz

$$R^{(2)}: \text{JEŻELI } x \text{ jest } A_2 \text{ I } y \text{ jest } B_2 \text{ TO } z \text{ jest } C_2 \quad (3)$$

gdzie: $x=V_{in}$ - aktualna (ostra) wartość skuteczna napięcia wejściowego przetwornika A/C_F, y - szybkości zmiany wartości x , z - wartość wzmacnienia toru prądowego licznika; A, B, C - wartości lingwistyczne (nazwy) zbiorów rozmytych.

Dokładność modelu rozmytego korektora zależy od poprawnie sformułowanych reguł, zawierających informacje o strukturze modelowanego systemu wyznaczenia żądanej wartości wzmacnienia. Wybór funkcji przynależności i jej typu, metody defuzyfikacji, użytych operatorów oraz metody interferencji (wnioskowania), mają wpływ na zakrzywienie płaszczyzny odwzorowania działania korektora. Przesłanka reguły rozmytej (JEŻELI x jest A I y jest B..., gdzie: $x \in X, y \in Y$) definiuje punkt w zbiorach wejściowych: X oraz Y, natomiast konkluzja (...TO z jest C, gdzie: $z \in Z$) zal. 2 punkt na zbiorze przestrzeni wyjścia Z. Dokładność odwzorowania powierzchni wejścia→wyjście modelowanego systemu wyznaczenia wzmacnienia można zwiększyć przy stałej gęstości siatki podziału (ilość reguł), poprzez odpowiednie rozmieszczanie punktów podparcia powierzchni modelu (Rys. 7 punkt P₁, P₂) definiowanych przez jego zbiór rozmytych reguł R^(k) [13].

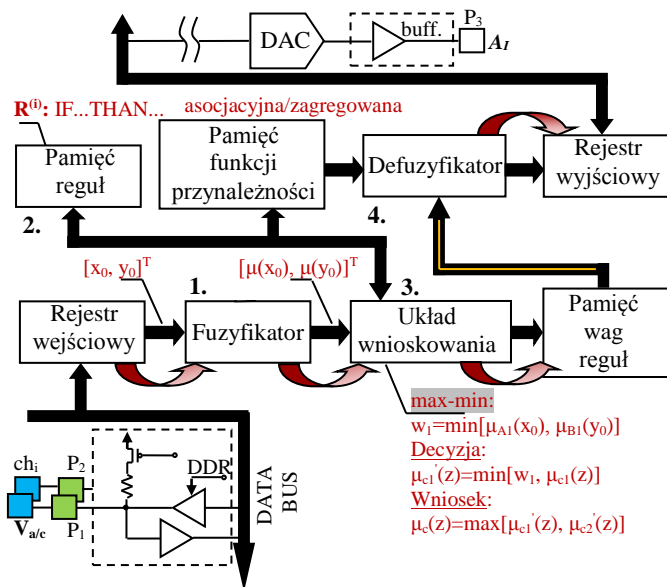
Na podstawie przedstawionych powyższych założeń została zaprojektowana trójwymiarowa płaszczyzna pracy systemu układu korektora. Wartościami wejściowymi są wartość skuteczna prądu oraz jego szybkość zmian, natomiast wyjście jest sygnałem reprezentującym odpowiednie wzmacnienie toru prądowego licznika (A_i) Rys. 7.



Rys. 7. Hiperpłaszczyzna odwzorująca działanie sterownika Mamdani'ego

Model sterownika rozmytego Mamdani'ego zaimplementowanego w układzie korektora wzmacnienia składa się ze zbiorów reguł $R^{(1)}, R^{(2)}, \dots, R^{(n)}$, z których każda definiuje jeden punkt (P_1, P_2, \dots, P_n) wejścia/wyjścia systemu rozmytego. Wszystkie punkty podlegają interpolacji w zależności od użytego aparatu logiki rozmytej, tworząc hiperpowierzchnię wyznaczającą odpowiednią wartość wzmacnienia toru prądowego licznika.

Schemat sterownika Mamdani'ego zaimplementowany w systemie mikroprocesorowym przedstawiono na Rys. 8.



Rys. 8. Architektura sterownika rozmytego [18]

Głównymi blokami składowymi sterownika Mamdani'ego z Rys. 7 są:

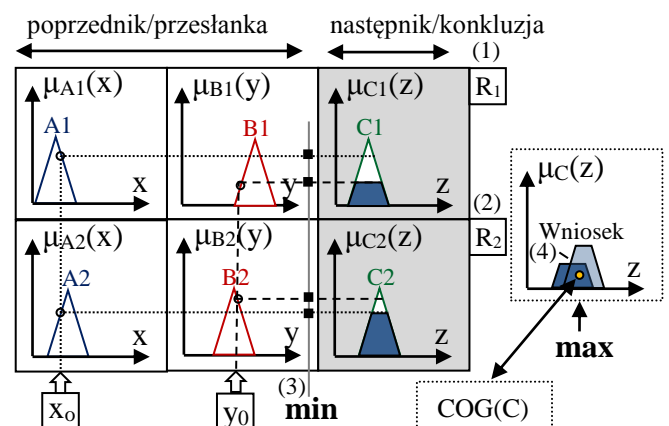
1. **Fuzzyfikator** (blok nr. 1) – wykorzystany do rozmywania, polegającego na transformacji wartości liczb z dziedziny rzeczywistych wprowadzonych do systemu rozmytego z zacisku P_1 mikroprocesora Rys. 8, na wartość z dziedziny zbiorów rozmytych,

2. **Pamięć reguł** (baza) (blok nr. 2) - zawiera zbiory reguł rozmytych $R^{(k)}$,
3. **Blok wnioskowania** (interferencji) (blok nr. 3) bazuje na wnioskowaniu przybliżonym, pozwalającym na wykorzystanie sformułowań rozmytych w przesłance i konkluzji, wykorzystując tautologię typu UMP (Uogólniony Modus Ponens) [14],
4. **defuzyfikator** (wyostrzenie) (blok nr. 4) pozwala na odwzorowanie wyjściowych zbiorów rozmytych z bloku wnioskowania w jedną konkretną ostrą wartość (zacisk wyjściowy mikrokontrolera P3 portu P Rys. 8). Autorzy artykułu wykorzystali metodę wyostrzenia wartości wyjściowej typu Środka Ciężkości - COG (ang. Center of Gravity), w której wartością wyjścia jest rzut środka ciężkości kształtu tworzonego przez wyjściowy zbiór rozmyty. Defuzyfikację według środka obszaru w postaci dyskretnej wyznacza się za pomocą wzoru [13]:

$$y'_{COG} = COG(C) = \frac{\sum_i \mu(y_i) y_i}{\sum_i \mu(y_i)} \quad (4)$$

gdzie: $\mu(y_i)$ - jest funkcją przynależności wynikowego wyjściowego zbioru rozmytego, y - jest wyjściową zmienną lingwistyczną.

Ze względu na wykorzystanie w niniejszej pracy, przesłanek koniunkcyjnych ze spójnikiem logicznym "I" oraz operatora implikacji Mamdani'ego (MAX-MIN), proces wnioskowania Mamdani'ego został schematycznie pokazany na (Rys. 9), dla połączenia wyników przetworzenia kilku reguł:



Rys. 9. Wnioskowane według implikacji Mamdani'ego (MAX-MIN), gdzie: A, B, C - zbiory rozmyte, x_0, y_0 - zmienne wejściowe, R_1, R_2 - reguły rozmyte, numery w nawiasie odpowiadają równaniom podanym w tekście referatu [2, 12, 17]

Wartości wielkości wejściowych (niskonapięciowy sygnał wejściowy kanału prądowego licznika energii) możemy traktować, jako singletony rozmyte. Korzystając z implikacji Mamdani'ego wyznaczamy wagę reguł na podstawie zależności [16, 17]:

$$w_1 = \min[\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0)] \quad (5)$$

gdzie: $\mu_A(x)$ - jest funkcją przynależności wartości ostrej x do zbioru rozmytego A .

Decyzją podejmowaną w otoczeniu rozmytym ($D=A_i \cap B_i$, \cap -operator przecięcia zbiorów) jest zbiór rozmyty C powstały w wyniku

przecięcia zbiorów (iloczyn) A i B o funkcji przynależności określonej zależnością [16, 17]:

$$\mu_{C_1}(z) = \min[w_1, \mu_{C_1}(z)] \quad (6)$$

gdzie: w_1 - waga reguły rozmytej o indeksie - 1, $\mu_{C_1}(z)$ - funkcja przynależności wynikająca z agregacją przesłanki złożonej z dwóch przesłanek prostych połączonych spójnikiem logicznym "I" ($T(\mu_{A_1}(x), \mu_{B_1}(y))$).

Wosikiem z dwóch reguł (zal. 2, 3) jest zbiór rozmyty C o funkcji przynależności określonej wzorem [16, 17]:

$$\mu_C(z) = \max[\mu_{C_1}(z), \mu_{C_2}(z)] = \max[\min[w_1, \mu_{C_1}(z)], \min[w_2, \mu_{C_2}(z)]] \quad (7)$$

gdzie: $\mu_C(z)$ - wynikowy zbiór rozmyty C o funkcji przynależności $\mu_C(z)$, z - zmienna lingwistyczna wyjściowa.

Zależność (7) nazywana jest metodą typu MAX-MIN, i jest ona powszechnie stosowana ze względu na jej łatwą implementację w systemie mikroprocesorowym.

3. STEROWNIK ROZMYTY TSK (TAKAGI-SUGENO-KANGA)

Model wnioskowania TSK w zastosowanych systemach rozmytych (Rys. 6) zyskał największą popularność ze względu na jego proste etapy wnioskowania rozmytego [4]. W tym sterowniku funkcja następnika zdefiniowana jest nie w sposób rozmyty, lecz ostry. Dzięki temu układ defuzyfikatora nie jest potrzebny, przez co wnioskowanie rozmyte staje się łatwiejsze [14].

Baza wiedzy sytemu rozmytego TSK zawiera reguły typu *jeżeli-to* zdefiniowane zależnością [15]:

$$R = \left\{ R^{(i)} \right\}_{i=1}^I = \left\{ \overbrace{JEZELI \bigwedge_{n=1}^N x_{0n} \text{ jest } A_n^{(i)}}^{\text{poprzednik/przeslanka}}, \overbrace{TO y = f_i(x_0)}^{\text{następnik/konkluzja}} \right\} \quad (8)$$

gdzie: I - liczba reguł w bazie wiedzy, $x_{0n} = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0N}]^T$ - singleton wejściowy, $A_n^{(i)}$ - wartość lingwistyczna przesłanki, $y = f_i(x_0)$ - funkcja w konkluzji i-tej reguły $R^{(i)}$.

Najczęściej wykorzystywane funkcje w następniku reguły rozmytej (zal. 8) są funkcjami liniowymi (wielomian pierwszego stopnia) o postaci [15]:

$$y^{(i)}(x_0) = p_0^{(i)} + p_1^{(i)}x_{01} + p_2^{(i)}x_{02} + \dots + p_N^{(i)}x_{0N} = \mathbf{p}^{(i)T} \mathbf{x}_0' \quad (9)$$

gdzie: $\mathbf{p}^{(i)}$ - (N+1) wymiarowy wektor parametrów funkcji $f_i(x_0)$, $\mathbf{x}_0' = \begin{bmatrix} 1 \\ x_0 \end{bmatrix}$ - rozszerzony wektor wejściowy.

Stoień aktywacji i-tej reguły rozmytej (zal. 8) jest wyznaczany na podstawie wzoru [15]:

$$F^{(i)}(x_0) = \mu_{A_1^{(i)}}(x_{01}) *_T \mu_{A_2^{(i)}}(x_{02}) *_T \dots *_T \mu_{A_N^{(i)}}(x_{0N}) \quad (10)$$

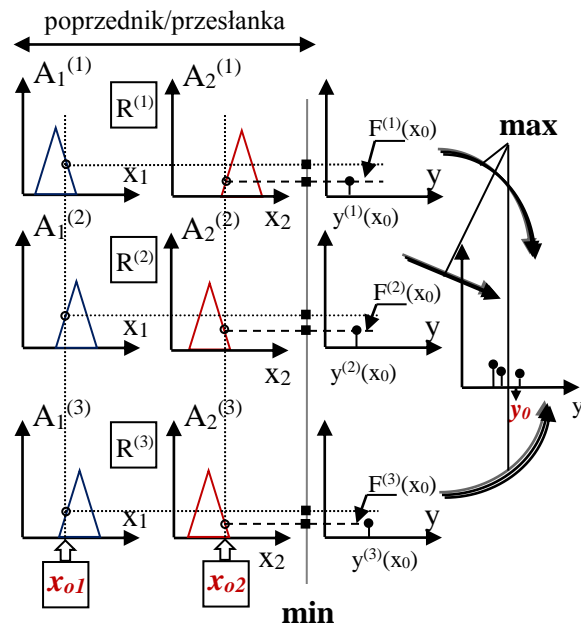
gdzie: $*_T$ - oznacza t-normę T (zazwyczaj implikacja Mamdani'ego minimum lub implikacja Larsena - operacja iloczynu algebraicznego PROD), $\mu_A(x)$ - funkcja przynależności przypisująca każdemu elementowi $x \in X$ stopień przynależności do zbioru rozmytego A.

Przy wielu regułach warunkowych ($I > 1$) (zal. 8) sygnał wyjściowy układu TSK określany jest jako średnia ważona sygnałów $y^{(i)}(x_0)$ odpowiadająca poszczególnym regułom [15]:

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^I F^{(i)}(x_0) y^{(i)}(x_0)}{\sum_{j=1}^I F^{(j)}(x_0)} \quad (11)$$

gdzie: $y^{(i)}(x_0) = f_i(x_0)$ - określa położenie singletonu w konkluzji i-tej reguły, $F^{(i)}(x_0)$ - stopień aktywacji i-tej reguły.

Przykład zasady działania systemu rozmytego TSK przy trzech regułach wnioskowania oraz dwóch zmiennych wejściowych (x_{01}, x_{02}) został przedstawiony na Rys.10.



Rys. 10. Przykładowy system rozmyty Takagi-Sugeno Kanga dla dwóch wejść (x_{01}, x_{02}) i jednego wyjścia (y_0) oraz trzech rozmytych reguł *jeżeli-to* ($R^{(1)}, R^{(2)}, R^{(3)}$) [12, 15]

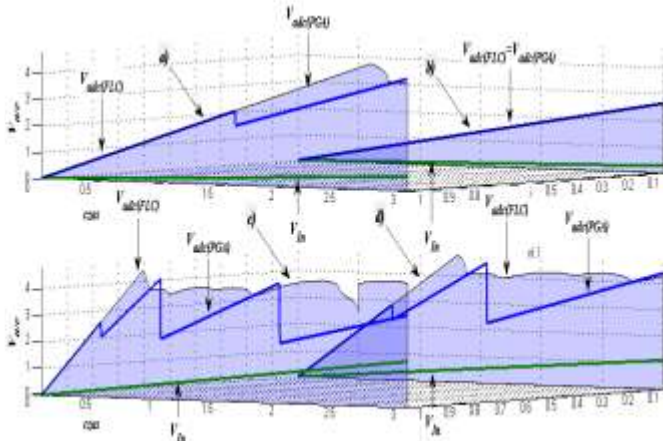
Lewa strona Rys. 10 odnosi się do poprzednika reguły rozmytej (zal. 8). Poziom zapłonu $F^{(i)}(x_0)$ wyznaczony został przy wykorzystaniu iloczynu logicznego minimum. Po prawej stronie Rys. 9 pokazany jest ostateczny (agregowany) wynik wnioskowania wyznaczony na podstawie zal. 11.

Sterownik TSK w kaskadowym połączeniu z układem Mamdani'ego koryguje uzyskane wzmocnienie A_i , w zależności od stanu pracy silnika napędowego. Wyróżniamy trzy stany pracy asynchronicznej maszyny elektrycznej: rozruch, praca silnikowa oraz hamowanie. W celu określenia stanu pracy maszyny, należy wyznaczyć jej prędkość kątową i jej wartość przekazać na wejście sterownika rozmytego.

Wykorzystanie dodatkowego sygnału poślizgu prędkości obrotowej napędowej maszyny elektrycznej w systemie rozmytym wyznaczającym wzmocnienie toru prądowego licznika jest związane ze wzrostem wartości prądu podczas rozruchu taboru szynowego. Należy zaznaczyć, że wiedza o procesie i strategiach sterowania oraz niezawodności systemu oparta jest na doświadczeniu eksperta. Zastosowanie dodatkowej płaszczyzny w systemie rozmytym poprawia, jakość pomiaru dynamicznego.

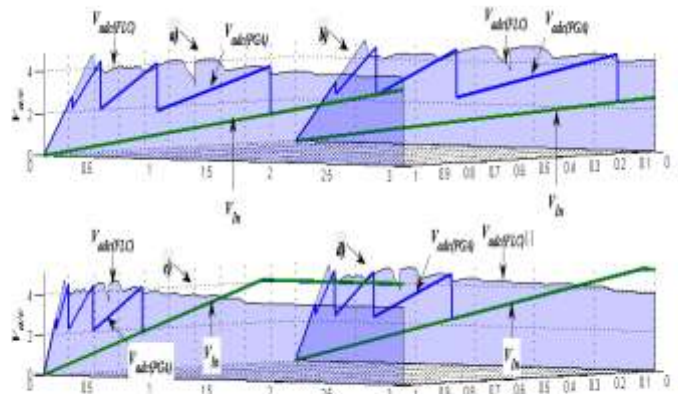
4. WYNIKI BADAŃ

Autorzy na podstawie przeprowadzonych rozważań dotyczących dopasowania zakresu sygnału źródła do zakresu przetwarzania przetwornika A/C_M zakładają, że graniczną wartością wejściową kanału prądowego licznika będzie sygnał osiągający wartość 80% napięcia referencyjnego przetwornika analogowo-cyfrowego (Rys. 5 źródło REF05). Przydatność układów programowalnych wzmacniaczy oraz sterownika rozmytego w układzie korektora wzmocnienia (Rys. 5) w pomiarach energii w taborze została sprawdzona przez podanie na ich wejście rodziny sygnałów napięciowych V_{in} o różnych wartościach szczytowych oraz różnych szybkościach narastania Rys. 11, 12. W pierwszej kolejności na wejście układu korektora zostały podane sygnały liniowe o małej wartości nachylenia (w stosunku do osi odciętej - czas), w przeliczeniu na stopnie geometryczne: 5° , 10° , 20° , 30° (Rys. 11).



Rys. 11. Przebiegi w układzie korekcji wzmocnienia sygnału wejściowego przetwornika A/C_M toru prądowego licznika energii przy nachyleniu sygnału testowego: a) 5° , b) 10° , c) 20° oraz d) 30° gdzie: $V_{adc(PGA)}$ - sygnał wejściowy A/C_M uzyskany za pomocą układu korekcyjnego wykorzystującego programowalny wzmacniacz PGA, $V_{adc(FLC)}$ - sygnał wejściowy A/C_M uzyskany za pomocą układu korekcyjnego wykorzystującego sterownik rozmyty, V_{in} - sygnał wyjściowy przetwornika prądowego

Odpowiedzi układu korekcyjnego zawierającego wzmacniacz typu PGA ($V_{adc(PGA)}$) oraz sterownik rozmyty ($V_{adc(FLC)}$) na eksperymentalny sygnał wejściowy będący wielomianem stopnia pierwszego zostały przedstawione na Rys. 11. W celu przeprowadzenia prawidłowego przebiegu eksperymentu identyfikacyjnego właściwości metrologiczne badanych układów korekcyjnych, zostały wprowadzone na jego wejścia sygnały o większych stałych narastania, odpowiednio dla 40° , 50° , 60° , 70° (Rys. 12).



Rys. 12. Przebiegi w układzie korekcji wzmocnienia sygnału wejściowego przetwornika A/C_M toru prądowego licznika energii, przy nachyleniu sygnału testowego: a) 40° , b) 50° , c) 60° oraz d) 70° gdzie: $V_{adc(PGA)}$ - sygnał wejściowy A/C_M uzyskany za pomocą układu korekcyjnego wykorzystującego programowalny wzmacniacz PGA, $V_{adc(FLC)}$ - sygnał wejściowy A/C_M uzyskany za pomocą układu korekcyjnego wykorzystującego sterownik rozmyty, V_{in} - sygnał wyjściowy przetwornika prądowego

Jak widać na Rys. 11 oraz Rys. 12 dla wszystkich wejściowych testowych sygnałów korektora w sposób jakościowy proponowana metoda rozmyta przewyższa tradycyjne algorytmy. Ze względu na sposób działania wzmacniacza programowalnego (wartość wzmocnienia będąca potęgą liczby 2) w kanale prądowym licznika pojawia się przebieg o charakterze piłokształtnym oznaczony na wykresach jako - $V_{adc(PGA)}$.

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono sposób zmiany współczynnika wzmocnienia toru prądowego trakcyjnego licznika energii elektrycznej. Błąd wyznaczania energii elektrycznej ma wartość odwrotnie proporcjonalną do wartości sygnału wejściowego przetwornika A/C_M pracującego ww. torze. Do uzyskania odpowiedniej wartości współczynnika wzmocnienia autorzy wykorzystali korektor rozmyty z bazą reguł wnioskowania Mamdaniego typu minimum oraz sterownik Takagi-Sugeno. Z badań symulacyjnych wnika, że najgorsze rezultaty dopasowania zakresu źródła sygnału do zakresu przetwarzania przetwornika A/C_M otrzymuje się przy wykorzystaniu wzmacniaczy o programowalnym współczynnikiem wzmocnienia w szczególności w pomiarach prądów szybkozmiennych. Powodem tego jest wzmocnienie tego wzmacniacza, które może przyjmować wartości binarne będące potęgami liczby 2 - 1, 2, 4, ..., 128.

BIBLIOGRAFIA

1. Bolikowski J., Podstawy projektowania inteligentnych przetworników pomiarowych wielkości elektrycznych, Monografie nr 68, Zielona Góra, 1993.
2. Ke-Lin Du, Swamy M. N. S., Neural Networks and Statistical Learning, „Springer”, Canada 2013.
3. Pérez J. P. A., Santiago Celma Pueyo, Belén Calvo López Automatic Gain Control. Techniques and Architectures for RF Receivers, „Springer”, 2011.
4. Mrozek B., Projektowanie regulatorów rozmytych w środowisku MATLAB-Simulink, Pomiary Automatyka Robotyka, 11/2006.
5. Gała M., Systemy pomiaru energii elektrycznej stosowane w elektrycznych pojazdach kolejowych, „Logistyka - nauka” 2015, nr 3.

6. Norma PN-EN 50463-2: 2013 Zastosowania kolejowe – Pomiar energii na pokładzie pociągu. Część 2 – Pomiar energii.
7. Pająk R., Moneta P., Bednarkiewicz T., Dokumentacja Techniczna – Ruchowa Licznik energii elektrycznej prądu stałego 3kV LE 3000plus, „ELESTER-PKP” Sp. z o.o., Łódź, listopad 2011.
8. Biliński J., Frydrysiak R., Gmurczyk E., Modernizacja systemu napędu elektrycznego zespołu trakcyjnego EN57 z zastosowaniem silników asynchronicznych, „Technika Transportu Szynowego”, 12/2008.
9. Biliński J., Buta S., Gmurczyk E., Kaska J., Nowoczesny asynchroniczny napęd z hamowaniem odzyskowym produkcji MEDCOM do zmodernizowanych elektrycznych zespołów trakcyjnych serii EN57AKŁ, „Technika Transportu Szynowego”, 12/2004.
10. FT-300-3000 Falownik trakcyjny do napędów asynchronicznych, MEDCOM 2006, Warszawa.
11. Prądnice i silniki w wykonaniu trakcyjnym, Zakład Maszyn Elektrycznych EMIT S.A, Żychlin.
12. Osowski S., Sieci neuronowe do przetwarzania informacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
13. Piegat A., Modelowanie i sterowanie rozmyte, Akademicka oficyna wydawnicza EXIT, Warszawa, 1998
14. Rutkowski L., Metody i techniki sztucznej inteligencji, PWN, 2012.
15. Łęski J., Systemy neuronowo-rozmyte, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2008.
16. Bohdan S. Butkiewicz, Układy rozmyte, część 1, „Elektronika Praktyczna”, 3/2000.
17. Bohdan S. Butkiewicz, Układy rozmyte, część 2, „Elektronika Praktyczna”, 4/2000.
18. Bohdan S. Butkiewicz, Układy rozmyte, część 3, „Elektronika Praktyczna”, 5/2000.
19. Dominikowski B., Pacholski K., Korekcja właściwości metrologicznych przetworników szybkozmiennych sygnałów elektrycznych, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr. 49, 2016.
20. Szelaąg A., Mierzejewski L., Systemy zasilania linii kolejowych dużych prędkości jazdy, tts (Technika Transportu Szynowego), 5-6/2005.

Intelligent correction of metrological properties of railway watt-hour meters

The paper was presented the possibility of using the fuzzy logic controller to correcting the metrological characteristics of the traction electricity watt-hours meter. Designed signal gain corrector allow to intelligently modification of the gain of in the low voltage input of the current path electricity watt-hours meter.

Autorzy:

dr inż. **Bartosz Dominikowski** – Politechnika Łódzka, Wydziałowy Zespół Systemów Pomiarowych, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej PŁ, bartosz.dominikowski@yahoo.com
dr hab. inż. **Krzysztof Pacholski**, prof. nadzw. – Politechnika Łódzka, Wydziałowy Zespół Systemów Pomiarowych, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej PŁ, kpacholski@o2.pl.
prof. dr hab. inż. **Jan Anuszczyk** - Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki PŁ, Zakład Transportu i Przetwarzania Energii
dr inż. **Andrzej Gocek** - Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki PŁ, Zakład Transportu i Przetwarzania Energii