

**DZIEKAN I RADA WYDZIAŁU  
ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I ELEKTRONIKI  
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ im. S. STASZICA W KRAKOWIE**

---

zapraszają na

**PUBLICZNĄ DYSKUSJĘ NAD ROZPRAWĄ DOKTORSKĄ**

**mgra inż. Marcina Szloska**

która odbędzie się 20.04.2009 r. o godz. 12:30 w bud. B-1, sala 25  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Temat rozprawy doktorskiej:

**„Zastosowanie sieci neuronowych do rozpoznawania zaburzeń elektromagnetycznych  
i pomiaru ich ilościowych wskaźników”**

PROMOTOR: dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka prof. AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza

RECENZENCI: dr hab. inż. Irena Wasiak – Politechnika Łódzka

prof. dr hab. inż. Michał Szyper – Akademia Górniczo-Hutnicza

---

Z rozprawą doktorską i opiniami recenzentów można się zapoznać w Czytelni Biblioteki Głównej AGH w Krakowie, al. Mickiewicza 30

---

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**Zastosowanie sieci neuronowych  
do rozpoznawania zaburzeń elektromagnetycznych  
i pomiaru ich ilościowych wskaźników**

mgr inż. Marcin Szlosek

**PROMOTOR:** dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka, prof. AGH

W rozprawie doktorskiej autor zaprezentował nowe podejście do problemu pomiaru wahań napięcia. W zamyśle autora było, aby działając w oparciu o normę definiującą specyfikację techniczną miernika migotania IEC 61000-4-15 zaproponować zastąpienie szeregu bloków funkcyjnych istniejących jako nieodzowna część miernika wahań napięcia, jednym blokiem traktowanym jako „czarna skrzynka” z zachowaniem charakterystyki przejścia pomiędzy wyjściem i wejściem miernika.

Dostępne na rynku analizatory energii elektrycznej – mierniki wahań napięcia wykazują rozbieżności w wynikach otrzymywanych podczas pomiarów porównawczych. Wynika to niejednokrotnie z rozbieżności w interpretacji wymagań projektowych stawianych przez normę, jak również z zastosowania techniki cyfrowej, podczas gdy dokument IEC 61000-4-15 w starszych wydaniach normy wyraźnie stanowi o analogowym rozwiązaniu miernika wahań napięcia.

Prowadząc rozważania nad możliwością alternatywnej metody pomiaru wahań napięcia, autor miał na uwadze kilkunastoletnie funkcjonowanie dokumentu normalizującego, oraz istnienie na rynku szeregu analizatorów funkcjonujących w oparciu o ten dokument. Dlatego celem prac nie było proponowanie nowego wskaźnika służącego do pomiaru wahań napięcia, zmieniającego całe dotychczasowe doświadczenia w tej dziedzinie.

Model neuronowego miernika wahań napięcia został stworzony w środowisku Matlab – SIMULINK. W procesie projektowania i prac symulacyjnych, jako przyrząd referencyjny wykorzystano model miernika migotania powstały w środowisku Matlab – SIMULIK. Miernik migotania światła został sprawdzony pod kątem poprawności otrzymywanych na jego wyjściu wyników, w trakcie pomiarów laboratoryjnych i pomiarów przemysłowych.

**Wstęp.** Jednym z zaburzeń występujących w systemie elektroenergetycznym, analizie którego poświęcona jest praca są wahania napięcia i efekt migotania światła będący następstwem ich występowania.

Wahania napięcia są to zmiany napięcia zawarte w przedziale  $\pm 10\%$  względem napięcia znamionowego  $U_N$  i częstotliwości do 35[Hz]. Można je opisać albo poprzez zakres zmian wartości skutecznej, albo obwiedni przebiegu czasowego napięcia. Można je scharakteryzować poprzez kształt wahań, amplitudę wahań, częstość, natomiast w przypadku, gdy wahania napięcia mają charakter

okresowy, można mówić o częstotliwości wahań napięcia.

Głównym skutkiem wahań napięcia, jest zjawisko migotania światła, które ujawnia się przez bezpośredni negatywny wpływ na organizm człowieka. Zjawisko to (*ang. flicker*) jest subiektywnym odczuciem zmian strumienia świetlnego, którego luminancja ulega zmianom w czasie. Efektem tego zaburzenia jest zakłócenie procesu widzenia, który zachodzi w układzie oko – mózg. Migotanie światła powoduje u człowieka złe samopoczucie, szybsze zmęczenie, znużenie, problemy z koncentracją, czy wręcz pogorszenie widzenia (zaburzony proces akomodacji). Skutki oddziaływania migotania światła na organizm

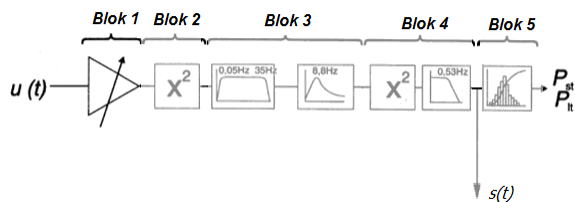
człowieka, zależą od amplitudy zmian strumienia świetlnego – a więc amplitudy zmian napięcia a czasu trwania zjawiska.

Oceny wahań napięcia można dokonać na dwa sposoby. Sposób bezpośredni polega na ilościowym oszacowaniu zjawiska, na podstawie czasowej zmiany wartości skutecznej lub obwiedni przebiegu czasowego napięcia. Bada się wówczas amplitudę wahań, częstość wahań napięcia lub energetyczną dawkę wahań napięcia. Dodatkowo uwzględnia się czas trwania, oraz odstępy czasu pomiędzy kolejnymi zmianami napięcia.

Sposób pośredni polega na pomiarze zjawiska migotania światła, które jest wywołane wahaniami napięcia. Celem pomiarowej oceny jest określenie stopnia ludzkiej irytacji wywołanej zmianami strumienia świetlnego. W tym procesie można wyróżnić trzy zasadnicze elementy: źródło napięcia o zmiennej wartości, oko ludzkie i realizujący się w nim proces postrzegania oraz mózg z jego nieliniowymi (w funkcji częstotliwości) reakcjami. Dostępny do pomiarowej oceny jest tylko pierwszy składnik, pozostałe muszą zostać zamodelowane. Tylko wówczas, gdy modelowanie tego złożonego układu będzie poprawne, możliwe będzie wskazywanie zależności pomiędzy wahaniami napięcia, a stopniem ludzkiej irytacji.

Wszystkie te fakty, oraz cała złożoność procesu fizjologicznego postrzegania, zostały uwzględnione przy tworzeniu miernika migotania UIE (Międzynarodowa Unia Elektrotechnologii). Umożliwia on ocenę zjawiska migotania światła niezależnie od kształtu wahań napięcia i źródła zaburzenia. Opracowana specyfikacja techniczna została poddana międzynarodowej dyskusji w ramach IEC i opublikowana jako norma IEC 61000-4-15.

Na rysunku 1. przedstawiono uproszczony schemat blokowy urządzenia umożliwiającego pomiar migotania światła.



Rysunek 1. Schemat blokowy miernika migotania światła

Dostępne na rynku analizatory energii elektrycznej – mierniki wahań napięcia wykazują rozbieżności w wynikach otrzymywanych podczas pomiarów porównawczych. Wynika to niejednokrotnie z rozbieżności w interpretacji wymagań projektowych stawianych przez normę, jak również z zastosowania techniki cyfrowej, podczas gdy

dokument IEC 61000-4-15 wyraźnie stanowi o analogowym rozwiązaniu miernika wahań napięcia.

Rozbieżności w wynikach pomiarowych wahań napięcia, stały się czynnikiem który, po analizie możliwych przyczyn, zainspirował do podjęcia prac nad innym podejściem do problemu pomiaru jednego z wskaźników jakości energii elektrycznej – wahań napięcia.

Ideą autora było takie potraktowanie problemu, aby działając w oparciu o normę IEC 61000-4-15 zaproponować zastąpienie szeregu bloków funkcyjnych istniejących jako nieodzowna część miernika wahań napięcia, jednym blokiem który traktowanym jako „czarna skrzynka” z zachowaniem charakterystyki przejścia pomiędzy wyjściem i wejściem miernika. Skłoniło to autora do postawienia następującej tezy:

*Istnieje możliwość skonstruowania, w oparciu o sztuczną sieć neuronową, analizatora jakości energii elektrycznej – przykładowo dla wahań napięcia – z zachowaniem charakterystyki wejście/wyjście miernika migotania zbudowanego w oparciu o normę IEC 61000-4-15.*

**Metodyka badań, struktura pracy.** W celu udowodnienia powyższej tezy, autor przyjął następujący plan pracy:

– Dokonano przeglądu dostępnych na rynku konstrukcji analizatorów dysponujących funkcją pomiaru wahań napięcia. Przeprowadzono szereg testów laboratoryjnych i przemysłowych mających na celu wykazanie istotnych rozbieżności pomiędzy funkcjonującymi konstrukcjami zbudowanymi w oparciu o normę, jak również potwierdzających zasadność prac nad nową koncepcją miernika migotania światła zbudowanego w oparciu o normę.

– W kolejnym etapie pracy miernik migotania światła był realizowany w środowisku sieci neuronowych. Sama realizacja miernika została poprzedzona analizą dostępnych struktur sieci neuronowych i ich ewentualną późniejszą przydatnością do rozwiązania postawionego problemu. Przeprowadzono szereg symulacji z różnymi konfiguracjami sieci i różnymi wariantami uczenia sieci neuronowej.

– Trzecim etapem realizacji pracy było przejście ze środowiska symulacyjnego do układu służącego prototypowaniu urządzeń elektronicznych, zdolnego do analizy sygnałów otrzymywanych w danym punkcie systemu elektroenergetycznego. Powstały miernik został przebadany w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych na stacji 110/30/15 [kV] w Krakowie Bieżanowie.

Jako element wstępnej analizy wskazań mierników migotania światła, wykorzystano wyniki pomiarów przemysłowych, oraz pomiary własne autora, wykonane podczas realizacji pracy. Model neuronowego miernika

wahań napięcia został stworzony w środowisku Matlab – SIMULINK. W procesie projektowania i prac symulacyjnych, jako przyrząd referencyjny wykorzystano model miernika migotania powstały w środowisku Matlab – SIMULIK. Model referencyjny, został wcześniej sprawdzony pod kątem poprawności otrzymywanych na jego wyjściu wyników, w trakcie pomiarów laboratoryjnych i pomiarów przemysłowych. Wybór środowiska został podyktowany bardzo dobrymi właściwościami odwzorowującymi, dużą wiarygodnością i powtarzalnością wyników. Nie bez znaczenia była również szeroka dostępność elementów bibliotek niezbędnych do zaprojektowania i opracowania neuronowego miernika migotania, jak również możliwość szybkiego przenoszenia danych wejściowych i wyników niezbędnych w procesie uczenia i testowania sieci neuronowej z modelu referencyjnego, który został zrealizowany w tym właśnie środowisku. Przeprowadzono szereg symulacji komputerowych, które z uwagi na ogromne ilości przetwarzanych danych prowadzone były z wykorzystaniem superkomputerów z Akademickiego Centrum Komputerowego – CYFRONET (superkomputer GRIZLY).

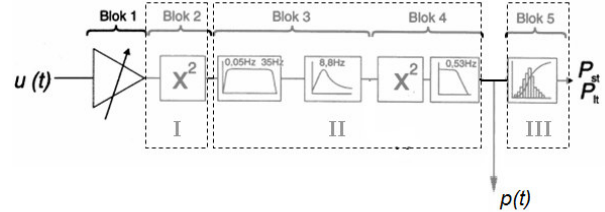
Opracowany w środowisku Matlab – SIMULINK model miernika był podstawą realizacji sprzętowej. Wykorzystano do tego celu środowisko dSpace z kartą DS1104, służące do szybkiego prototypowania.

**Zastosowanie sieci neuronowych w pomiarach wahań napięcia.** W przypadku rozpatrywania miernika migotania światła jako „czarnej skrzynki” został on podzielony na trzy podstawowe elementy. Dwa z nich działają w oparciu o sieć neuronową (*blok I, blok II*), trzeci zawiera statystyczną ocenę wyników otrzymanych z części neuronowej (*blok III*). Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy miernika migotania. W skład schematu blokowego z rysunku 2 wchodzi:

1. blok I – blok demodulujący obwiednię sygnału wejściowego
2. blok II – właściwy blok pomiarowy realizujący proces klasyfikacji wahań napięcia względem przyjętych norm. Na wyjściu bloku II otrzymujemy przebieg chwilowy migotania światła  $p(t)$ , odpowiadający przebiegowi otrzymywanemu na wyjściu bloku 4 w klasycznym mierniku migotania światła.
3. blok III – zawiera element analizy statystycznej przebiegu  $p(t)$  otrzymanego na wyjściu bloku II.

Analiza statystyczna była przeprowadzona w sposób analogiczny jak w przypadku miernika migotania zbudowanego w oparciu o normę Część statystyczna

była niezbędna, aby móc ocenić czy wskazania całości układu były zbliżone do miernika klasycznego oraz jaką niepewność pomiaru posiadał miernik neuronowy.



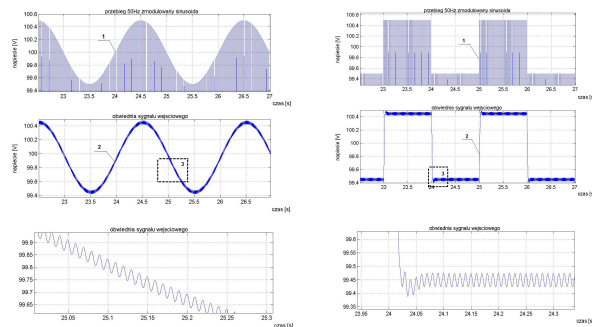
Rysunek 2. Schemat blokowy miernika migotania światła

Celem prowadzonych badań było przedstawienie koncepcji sieci neuronowej realizującej zadania miernika migotania oraz ocena efektów jej uczenia. Ocena poprawności działania modelu neuronowego została zweryfikowana poprzez wykonanie szeregu testów laboratoryjnych, którym zostały poddane inne przyrządy dostępne na rynku. W kolejnym etapie poprawność działania tak powstałego miernika została sprawdzona w warunkach testu przemysłowego przez porównanie wskazań z innym miernikiem przyłączonymi we wspólnym punkcie pomiarowym. Zbiór sygnałów wejściowych i wyjściowych dla przeprowadzonych testów, otrzymany dla modelu stworzonego w środowisku MATLAB został przyjęty jako zbiór uczący dla sieci neuronowej. Projektowana sieć neuronowa miała w zamiarze autora odtworzyć działanie miernika migotania, z wyłączeniem bloku przetwarzania statystycznego, czyli zgodnie z normą IEC 61000-4-15 bloki od 1 do 4. Pozostawienie obróbki statystycznej w niezmienionej formule wynikało z jasno określonego algorytmu obliczania  $P_{st}$  i  $P_{lt}$  na podstawie wyników uzyskiwanych z bloków 1 - 4 miernika migotania światła.

**Demodulacja obwiedni dla różnych sposobów modulacji (blok I).** Rozkład przebiegu wejściowego na harmoniczne przeprowadzono wykorzystując metodę gradientową Widrowa – Hoffa, opartą na metodzie najmniejszego błędu średniokwadratowego obliczanego dla każdej iteracji, stąd współlistniejąca nazwa - reguła LMS (ang. Least-Mean-Square).

Zastosowanie takiej właśnie metody związane było z jej prostą implementacją połączoną z dobrą dokładnością otrzymanych wyników. W efekcie tego rozkładu otrzymano przebieg odwzorowujący obwiednię sygnału wejściowego. Przykład rozkładu sygnału sinusoidalnego modulowanego przebiegiem sinusoidalnym o parametrach  $f_m=0,5$ [Hz]  $A_m=0,35$  na składowe spektralne oraz wyniki rozkładu sygnału sinusoidalnego modulowanego przebiegiem prostokątnym o parametrach  $f_m=0,5$ [Hz]  $A_m=1$  przy użyciu sieci neuronowej przedstawione zostały na rysunku 3

Estymowano składowe do 50, ale dla prowadzonych prac badawczych wykorzystano tylko 12 pierwszych. Na przebiegach przedstawionych na rysunku 3 widać, że występują bardzo wyraźne oscylacje sygnału w całym przedziale czasu zarówno w przypadku modulacji sinusoidalnej jak i modulacji prostokątnej (wyłączając z boczka przebiegu prostokątnego). Wynika to ze sposobu estymacji obwiedni z wykorzystaniem wspomnianej wcześniej metody Widrowa – Hoffa. Estymacji obwiedni przebiegów wejściowych dokonano za pomocą funkcji standardowej występującej w bibliotece sieci neuronowych środowiska Matlab.



Rysunek 3. Przebiegi zmian wartości przebiegu zmodulowanego sinusoidą i prostokątem (1), powiększenie zaznaczonych (3) fragmentów

**Estymacja chwilowej wartości migotania (blok II).** Wyniki otrzymane w wyniku estymacji obwiedni przebiegu wejściowego w bloku I pozwalają na wykorzystanie tych przebiegów w dalszym procesie uczenia sieci neuronowej odpowiedzialnej za relację pomiędzy sygnałem wejściowym – obwiednią i sygnałem wyjściowym z bloku 4 miernika migotania. W tym celu na wejście drugiego bloku sieci neuronowej podano estymowany w bloku I sygnał obwiedni przebiegu zmodulowanego oraz przebieg wyjściowy otrzymany z bloku 4 modelu miernika migotania. W celu określenia liczby neuronów w poszczególnych warstwach i liczby warstw w strukturze sieci neuronowej przeprowadzono szereg symulacji. Sprawą kluczową w symulacjach był właściwy dobór liczby neuronów w poszczególnych warstwach. W warstwie wyjściowej zastosowano pojedynczy neuron, z uwagi na jednowymiarowy charakter odpowiedzi układu. W celu zmniejszenia liczby symulacji ograniczono się jedynie do wykorzystania w warstwach ukrytych takiej samej liczby neuronów jak w warstwie wejściowej. Zmiana zarówno liczby neuronów w warstwie wejściowej i warstwie/warstwach ukrytych w sposób znaczący zwiększa czas obliczeń. Efektem każdej symulacji było osiągnięcie zakładanej dokładności w funkcji liczby neuronów i czasu symulacji. Błąd oceny procesu uczenia sieci neuronowej był różnicą średniej kwadratowej

przebiegu sieci neuronowej od przebiegu wzorcowego. Po wybraniu struktury sieci neuronowej, która przyniosła najlepsze wyniki procesu uczenia, przeprowadzono uczenie sieci neuronowej z wykorzystaniem wszystkich punktów dostępnych w normie.

Metodą zastosowaną w procesie uczenia była metoda wstecznej propagacji błędów.

Algorytm wstecznej propagacji - BP (ang. BackPropagation) określa strategię doboru wag w sieci wielowarstwowej przy wykorzystaniu gradientowych metod optymalizacji. Podczas procesu uczenia sieci dokonuje się prezentacji pewnej liczby zestawów uczących (tzn. wektorów wejściowych oraz odpowiadających im wektorów sygnałów wzorcowych (wyjściowych)). Uczenie polega na takim doborze wag neuronów by w efekcie końcowym błąd popełniany przez sieć był mniejszy od zadanego. Nazwa "wsteczna propagacja" pochodzi od sposobu obliczania błędów w poszczególnych warstwach sieci. Najpierw obliczane są błędy w warstwie ostatniej (na podstawie sygnałów wyjściowych i wzorcowych). Błąd dla neuronów w dowolnej warstwie wcześniejszej obliczany został jako funkcja błędów neuronów warstwy poprzedzającej. Sygnał błędu rozprzestrzenia się od warstwy ostatniej, aż do warstwy wejściowej, a więc wstecz.

Analizując wyniki otrzymane w przypadkach uczenia sieci neuronowej przedstawione szerzej w tekście pracy autor stwierdził, że wystarczającym kryterium przydatności otrzymanych wyników było zachowanie wartości średniej przebiegu wartości chwilowej migotania światła. Autor przeprowadził szereg prób w wyniku których wartość średnia sygnału referencyjnego i sygnału otrzymanego na wyjściu z sieci neuronowej zawierała się na poziomie nie odbiegającym od siebie. Było to na tyle ważne, że na podstawie wartości średniej chwilowego migotania światła wyliczany został krótkookresowy wskaźnik migotania światła  $P_{st}$ .

**Blok analizy statystycznej chwilowej wartości migotania (blok III).** Kolejnym etapem prac było opracowanie bloku III – czyli obróbki statystycznej. Norma IEC 61000-4-15, opisuje sposób obliczania  $P_{st}$ , na podstawie chwilowej wartości migotania  $p(t)$  otrzymanej na wyjściu bloku 4. Aby móc porównać wyniki miernika „neuronowego” z innymi dostępnymi na rynku miernikami migotania należy obliczyć wskazanie  $P_{st}$  w sposób analogiczny jak w normie. Zastosowanie tego bloku do porównania wskazań między miernikami było niezbędne z uwagi na brak wyjścia chwilowej wartości migotania światła  $p(t)$  – wyjście bloku 4 z większości klasycznych konstrukcji miernika, za wyjątkiem modeli zrealizowanych w środowisku MATLAB.

**Zastosowanie sieci rekurencyjnych jako elementu estymacji chwilowej wartości migotania (blok II).** Porównując wyniki otrzymane w dotychczasowych badaniach dla różnych sposobów przetwarzania danych pomiarowych podawanych na wejście neuronowej części miernika (blok II) i ich niewystarczającą dokładność szczególnie, jeżeli chodzi o przypadek modulacji przebiegiem prostokątnym, powstała konieczność przetestowania innego rodzaju sieci neuronowej. W odróżnieniu do stosowanej dotychczas sieci liniowej, zastosowano sieć neuronową – rekurencyjną.

Sieci rekurencyjne w sposób zasadniczy różnią się od sieci liniowych tym, że posiadają połączenia wewnątrz sieci pomiędzy wyjściami warstw ukrytych a wejściami tych warstw, – czyli posiadają sprzężenie zwrotne, co powinno przyspieszyć proces uczenia a tym samym poprawić uzyskiwane wyniki. Trudnością w korzystaniu z sieci rekurencyjnych było ich trudniejsze zastosowanie do konkretnego przypadku. Korzystając z zasobów biblioteki Matlab, możemy skorzystać z jednego z dwóch rodzajów zastosowanych sieci rekurencyjnych – sieci Elmana i sieci Hopfielda.

Warto dodać, że blok przygotowania sygnału wejściowego (blok I) oraz część będąca realizacją bloku analizy statystycznej (blok III) wykazują zadowalające rezultaty. Dlatego zmianę struktury ograniczono tylko do *bloku II*.

W przypadku sieci neuronowej zastosowanej jak w badanym przypadku do analizy przebiegów stochastycznych, bo o takich mówimy w przypadku wahań napięcia, zastosowanie praktyczne powinna mieć sieć Elmana. Sieć ta posiada wewnętrzne sprzężenia zwrotne, pomiędzy neuronami poszczególnych warstw i są desygnowane do uczenia i generowania szybkozmiennych przebiegów takich jak np. wahania napięcia.

**Blok analizy statystycznej chwilowej wartości migotania (blok III) – sieć rekurencyjna i sieć liniowa (porównanie).** Otrzymane wyniki z sieci rekurencyjnej Elmana poddano analizie statystycznej, przygotowanej w sposób analogiczny jak w przypadku sieci liniowej. W tabeli 1 przedstawiono wyniki analizy statystycznej otrzymanych sygnałów na wyjściu sieci neuronowej. Odchyłka względna została obliczona na podstawie danych otrzymanych z modelu (MATLAB) i sieci neuronowej (liniowej i rekurencyjnej).

Porównując wartość błędu względnego  $P_{st}$  otrzymanego dla różnych rodzajów sieci neuronowej, możemy zaobserwować zmniejszenie jego wartości w przypadku zastosowania sieci rekurencyjnej (tabela 1). Jedynie w punktach 1 i 4 wartość błędu wzrosła, przy czym w przypadku 4 błąd poza zmianą o blisko

25% wykazuje również zmianę znaku. Biorąc pod uwagę niewielkie zmiany odchyłki wyników otrzymanych w przypadku zastosowania sieci liniowej i sieci rekurencyjnej w stosunku do wyników otrzymanych na wyjściu modelu miernika autor zdecydował, że w etapie realizacji miernika w środowisku dSpace zastosowana zostanie liniowa sieć neuronowa

Tabela 1 Odchyłka względna  $P_{st}$

Lp.	$P_{st}$ (model)	$P_{st}$ (sieć rekurencyjna)	Odchyłka względna [%]	$P_{st}$ (sieć liniowa)	Odchyłka względna [%]
1.	0,711	0,710	0,17	0,711	0,097
2.	0,694	0,698	-0,56	0,702	-1,049
3.	0,693	0,693	0,02	0,691	0,368
4.	0,617	0,702	-13,66	0,552	10,606
5.	0,704	0,70	0,12	0,698	0,953

**Sprzętowa realizacja miernika migotania w środowisku dSpace.** Kolejnym etapem prac było przeniesienie modelu symulacyjnego wykonanego w środowisku MATLAB – SIMULINK do środowiska służącego do prototypowania dSpace. Był to niezbędny element mający na celu sprawdzenie działania neuronowego miernika migotania dla sygnałów rzeczywistych.

Aby zachować ciągłość prowadzonych badań postanowiono zastosować w środowisku dSpace poszczególne bloki funkcyjne. W pierwszej kolejności należało w taki sposób skonfigurować środowisko dSpace, aby w prawidłowy sposób dokonywać odczytu z karty pomiarowej sygnałów wejściowych, oraz odwzorować *blok I* – blok demodulujący obwiednię sygnału wejściowego.

Kolejnym etapem była realizacja sprzętowa sieci neuronowej odpowiedzialnej za najbardziej interesującą część miernika migotania światła, czyli *bloku II* – właściwy blok pomiarowy realizujący proces klasyfikacji wahań napięcia względem przyjętych standardów. Na wyjściu *bloku II* otrzymano przebieg chwilowy migotania światła  $p(t)$ , odpowiadający przebiegowi otrzymywanemu na wyjściu bloku 4 w klasycznym mierniku migotania światła.

Ostatnim etapem było przeniesienie do środowiska dSpace części miernika migotania światła, *bloku III* – zawierającego element analizy statystycznej przebiegu  $p(t)$  otrzymanego na wyjściu *bloku II*. Analiza statystyczna była przeprowadzona w sposób analogiczny jak w przypadku miernika migotania zbudowanego w oparciu o normę. Z uwagi na nierozzerwalną współpracę pomiędzy środowiskiem dSpace i środowiskiem Matlab, podjęto decyzję o pozostawieniu analizy statystycznej w postaci, zgodnej z modelem komputerowym. Tak więc dane pomiarowe uzyskiwane na wyjściu *bloku II* są zbierane

i obrabiane do postaci końcowego odczytu  $P_{st}$  jako element Matlab'a

**Podsumowanie i wnioski.** Podczas badań zmierzających do rozwiązania postawionego problemu przeanalizowano występujące w dokumentach normalizacyjnych nieprecyzyjne sformułowania a następnie przeprowadzono weryfikację i wybór rozwiązań potwierdzonych otrzymanymi wynikami.

Wybór odpowiedniego rozwiązania powiązany był z konsultacjami w gronie zarówno akademickim jak i wiązał się z odzewem ze strony pewnej grupy producentów urządzeń do pomiaru wahań napięcia.

Przy udziale autora pracy przeprowadzono proces doprecyzowania zapisów międzynarodowej normy IEC 61000-4-15, zapobiegający sytuacjom dowolności w interpretowaniu ich zapisów.

Opracowany model symulacyjny stał się podstawą do przeprowadzenia sprzętowej realizacji miernika w środowisku dSpace. Zrealizowany miernik został poddany wielokrotnym testom zarówno w warunkach laboratoryjnych jak również w środowisku przemysłowym. Ocena dokładności wyników pomiarów została oparta na wskazaniach przyrządów uznanych przez autora za referencyjne. W przypadku pomiarów laboratoryjnych przyrządem tym był MEMOBOX 800, natomiast w przypadku pomiarów w środowisku przemysłowym przyrządem tym był TOPAS 1000. Nie wykazana została zasadnicza rozbieżność wyników pomiędzy dwoma dostępnymi na rynku urządzeniami a konstrukcją będącą efektem pracy autora. Wyniki otrzymane na wyjściu powstałego miernika nie klasyfikują go jako miernika klasy A, co najwyżej jako przyrząd klasy B.

Za oryginalne elementy niniejszej pracy należy uznać:

1. Stwierdzenie nieściśłości we wskazaniach mierników migotania światła dostępnych na rynku
2. Wykazanie nieściśłości znajdujących się w dokumentach normalizacyjnych, dotyczących opisu sygnałów będących testowymi dla oceny poprawności wskazań mierników migotania światła.
3. Zaproponowanie nowych i modyfikacja, pod kątem większej funkcjonalności, obowiązujących testów sprawdzających powtarzalność wyników pomiarów i przydatność mierników do oceny poziomu wahań napięcia.

4. Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji – sztucznej sieci neuronowej jako elementu miernika wskaźników jakości energii elektrycznej – w tym konkretnym przypadku – wahań napięcia
5. Realizacja sprzętowa modelu komputerowego neuronowego miernika migotania światła, w środowisku dSpace, którego wyniki pomiarów nie odbiegają bardzo znacząco od wyników mierników dostępnych na rynku, zbudowanych w oparciu o normę

Zastosowane rozwiązanie posiada bardzo duże możliwości poznawcze, ale nie jest pozbawione słabych punktów które należałoby zweryfikować w przypadku kontynuowania prac nad tematem. Dlatego też autor mając to na względzie proponuje:

1. Wykorzystanie idei „czarnej skrzynki” do zmiany w sposobie podejścia do miernika wahań napięcia.
2. Zmianę sposobu identyfikacji sygnału modulującego – obwiedni, tak aby uzyskać lepsze wyniki
3. Zastosowanie bardziej zaawansowanych układów sztucznych sieci neuronowych

### Publikacje doktoranta:

1. Piekarz M., **Szlosek M.**: Analiza porównawcza wskazań mierników migotania światła w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych, Praca Dypłomowa Magisterska, AGH – Kraków, 2002
2. Piekarz M., **Szlosek M.**, Hanzelka Z., Bien A., Stankiewicz A., Hartman M.: Comparative tests of flickermeter. 10<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power, Rio de Janeiro, 6-9 October 2002
3. **Szlosek M.**, Piekarz M., Hanzelka Z., Bien A., et al.: Comparative tests of flickermeters. 17<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution Barcelona 2003
4. **Szlosek M.**, Hanzelka Z., Bien A., Hartman M., Rogoż M.: IEC Flickermeter used in power system monitoring, Part 1: Comparative tests. Electrical Power Quality and Utilisation, 1, 2003
5. **Szlosek M.**, Świątek B., Hanzelka Z., Bien A.: Application of neural networks to voltage fluctuations measurement – a proposal for a new flickermeter. 11<sup>th</sup> ICHQP Lake Placid (USA). 12-15.09.2004
6. **Szlosek M.**, Hanzelka Z., Świątek B.: The proposal for a new flickermeter” 41<sup>st</sup> CIGRE 2006 session, Paris France 27 August – 01September 2006
7. **Szlosek M.**, Hanzelka Z., Świątek B.: Application of neural networks to voltage fluctuations measurement – CIRED 2007, 19<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 21-24 May 2007