

*Krzysztof DOWALLA¹, Robert LUKASZEWSKI¹, Augustyn WÓJCIK¹,
Marcin JANUSZEWSKI²*

¹Politechnika Warszawska, Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych

²Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki

ADAPTACJA SYSTEMU POMIAROWEGO I METODA PRZYGOTOWANIA DANYCH DO BADAŃ ALGORYTMÓW NIALM

W artykule przedstawiono system pomiarowy pozwalający na pozyskanie danych używanych w badaniach algorytmów nieinwazyjnego monitorowania zużycia energii elektrycznej. System pozwala na wielokanałową rejestrację sygnałów napięcia i prądu, na dwu stanowiskach z różnymi częstotliwościami próbkowania. Zaproponowano metodę umożliwiającą automatyczne etykietowanie danych pozwalających na opis zmian stanów odbiorników energii elektrycznej pracujących w badanym obwodzie sieci nn. Zaproponowano metodę wyznacza sygnatur prądowych odbiorników energii elektrycznej. Sygnatury te są charakterystyczne dla poszczególnych urządzeń. Pozwalają na rozpoznanie i określenie stanu urządzenia.

ADAPTATION OF MEASURING SYSTEM AND METHOD FOR PREPARING DATA FOR RESEARCHES OF NIALM ALGORITHMS

The paper presents the measurement system allowing for obtaining data necessary for evaluation of non-intrusive load monitoring algorithms. The system enables multi-channel measurement of voltage and current signals at two acquisition locations with different sampling frequencies. The paper proposes a method for automatic data labeling, which can be further used to describe changes in the states of electrical appliances operating in the examined low-voltage network. The paper proposed also a method for determining the current signatures of electrical appliance. These signatures are specific to each device. That make it possible to recognize and determine the state of the appliance.

1. WSTĘP

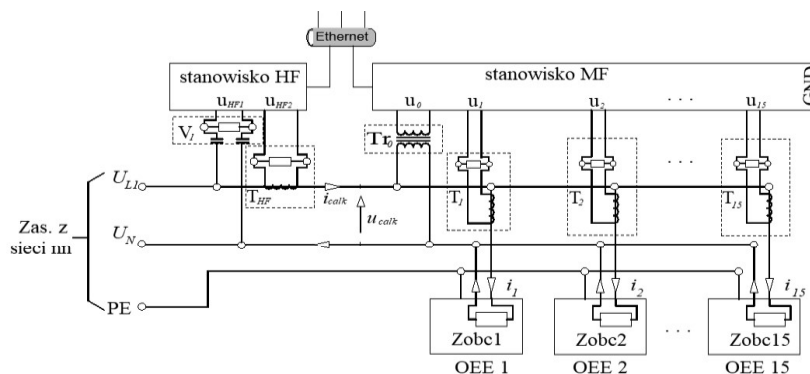
Głównym zadaniem systemów NIALM (ang. Non-Intrusive Appliance Load Monitoring) jest określenie stanu pracy odbiorników energii elektrycznej (OEE) w dziedzinie czasu, co pozwala na uzyskanie rozkładu zużycia energii elektrycznej na poszczególne OEE. Systemy NIALM jako dane wejściowe przyjmują wartości parametrów elektrycznych OEE oraz określone wartości parametrów sygnałów napięć i prądów sieci nn. Do analizy zmian tych wartości i podejmowania decyzji wykorzystywane są różne algorytmy sztucznej inteligencji [1]. Badania wskazują, że informacje zwrotne z takiego systemu przekładają się na obniżenie zużycia energii w gospodarstwie domowym średnio na poziomie 12% [2]. Dostępne powszechnie bazy danych nie zawierają danych pomiarowych zarejestrowanych przy częstotliwości próbkowania umożliwiającą analizę wyższych harmonicznych sygnałów, a tym bardziej nie pozwalają na badanie algorytmów wykorzystujących wysokoczęstotliwościową analizę zakłóceń w sygnałach napięć i prądów w obwodzie sieci nn. Dodatkowo w tych bazach brak jest szczegółowych informacji o stanach pracy poszczególnych OEE w określonych chwilach. Problemem jest też ograniczona liczba dostępnych zbiorów zawierających kompletny opis stanów badanych OEE oraz zawierających dane pomiarowe sygnału prądu i napięcia zarejestrowane z częstotliwością próbkowania większą niż 1 Hz [3]. Niewystarczający dostęp do baz zawierających odpowiednie dane pomiarowe jest istotnym problemem dla rozwoju badań nad algorytmami identyfikacji stanów pracy OEE. W artykule opisano modyfikacje wprowadzone do wykorzystywanego wcześniej systemu pomiarowego oraz metodę przygotowania danych na potrzeby badań algorytmów NIALM.

2. METODA POMIAROWA

W wykorzystywanym systemie pomiarowym możliwe jest prowadzenie pomiarów zarówno z częstotliwością próbkowania na poziomie kilkudziesięciu kHz jak i pojedynczych MHz. Uproszczony schemat wykorzystywanego systemu przedstawiono na rys. 1, szczegółowy schemat umieszczono i opisano w [4]. System pomiarowy składają się z dwu stanowisk komputerowych do akwizycji danych pomiarowych oraz oprogramowanie do przetwarzania tych danych. Pierwsze stanowisko (MF) umożliwia akwizycję danych z maksymalną częstotliwością próbkowania 62.5 kHz przy jednoczesnej rejestracji na 16 kanałach z rozdzielczością 16 bitów. Drugie stanowisko (HF) służy do pomiarów z maksymalną częstotliwością próbkowania 10 MHz na 2 kanałach z rozdzielczością 12 bitów. Należy podkreślić, że na potrzeby badań

algorytmów do analiz stanów ustalonych pożądane jest umiejscowienie w czasie zmian stanu OEE z dokładnością do 20 ms. Sygnały reprezentujące wartość sygnału prądu na głównym przewodzie zasilającym $u_{HF2}(n)$ oraz sygnały $u_j(n)$, gdzie $j \in \langle 1, 15 \rangle$ na poszczególnych gniazdkach mierzone są przy wykorzystaniu przekładników prądowych, oznaczonych na rys. 1 odpowiednio jako T_{HF} oraz T_j . W torze pomiarowym sygnału napięcia dla stanowiska HF zastosowano filtr górnoprzepustowy V_1 w celu stłumienia składowej podstawowej w sygnale napięcia $u_{calc}(t)$. W wyniku pomiaru otrzymuje się sygnał cyfrowy $u_{HF1}(n)$. Dodanie filtra V_1 pozwala na zmniejszenie zakresu pomiarowego karty pomiarowej na stanowisku HF, co umożliwi pomiar sygnałów prądu i napięcia z większą rozdzielczością. Na stanowisku MF przy wykorzystaniu transformatora T_0 obniżany jest poziom napięcia, co pozwala na bezpieczny pomiar sygnału napięcia $u_{calc}(t)$ oraz lepsze wykorzystanie rozdzielczości bitowej karty akwizycji. W wyniku pomiaru tego napięcia dokonywanego na kanale numer 0 stanowiska MF otrzymuje się sygnał cyfrowy $u_0(n)$.

Kluczowym dla możliwości realizacji automatycznego opisu danych pomiarowych jest jednoczesny pomiar poboru prądu przez każdy OEE podłączony do badanego obwodu nn. W opisywanym systemie pomiarowym jest to możliwe dzięki wykorzystaniu dedykowanej instalacji elektrycznej, umożliwiającej indywidualne opomiarowanie 24 gniazdek. Dzięki stanowisku MF, możliwa jest rejestracja wartości sygnałów prądu pobieranych przez OEE dołączone do poszczególnych gniazdek. Przy wykorzystaniu przekładników prądowych T_j mierzone są sygnały $u_j(n)$, gdzie $j \in \langle 1, 15 \rangle$ reprezentujące wartość sygnału prądu pobieranego na gniazdku opomiarowanym na kanale pomiarowym numer j .



Rys. 1. Schemat systemu pomiarowego.

Fig. 1. Scheme of measuring system.

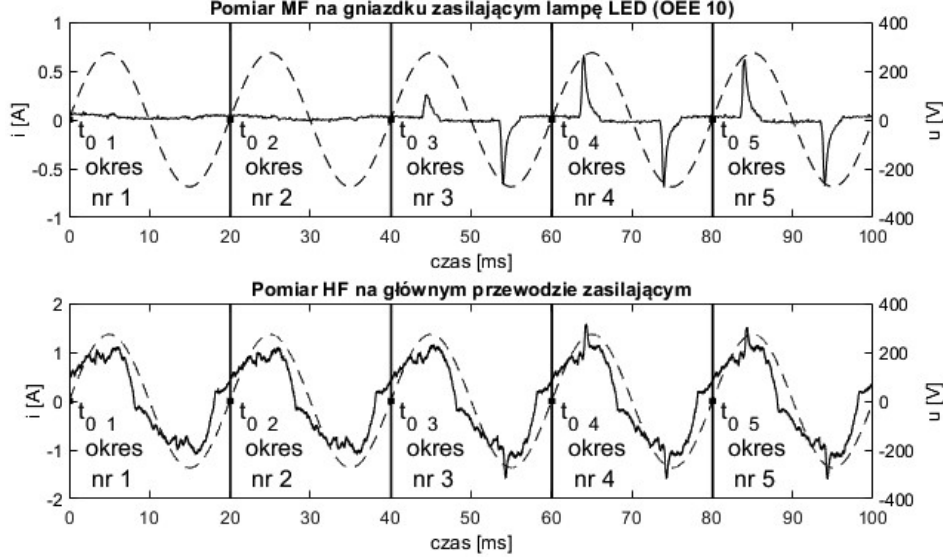
Pomiar na obu stanowiskach (MF i HF) realizowany jest przez oprogramowanie zrealizowane w środowisku LabVIEW. Na stanowisku HF pomiary są dokonywane z częstotliwością próbkowania $f_{sHF}=250$ kHz, zaś na stanowisku MF z częstotliwością $f_{sMF}=12.5$ kHz. Oba stanowiska są podłączone do sieci lokalnej Ethernet. Pomiar na obu stanowiskach uruchamiany jest z poziomu wirtualnego narzędzia pomiarowego na stanowisku HF. Wiąże się to z nieznacznym, zmiennym opóźnieniem rozpoczęcia rejestracji danych pomiarowych na obu stanowiskach. Synchronizacja i opis danych pomiarowych realizowana jest programowo w środowisku MATLAB po zakończeniu rejestracji danych.

3. SYNCHRONIZACJA DANYCH ORAZ OPIS DANYCH

W proponowanej metodzie, dla sygnałów napięć, zarejestrowanych na obu stanowiskach (MF i HF), realizowana jest filtracja dolnoprzepustowa przy wykorzystaniu filtru Butterwortha trzeciego rzędu o paśmie zaporowym powyżej 70 Hz. Sygnały po filtracji $u_{HF1}(n)$ oraz $u_0(n)$ zawierają jedynie składową podstawową u_{calc} . Wykrycie wszystkich momentów przejścia składowej podstawowej przez zero z wartości ujemnych do dodatnich, oznaczonych jako t_{0k} , pozwala na zliczenie okresów składowej podstawowej napięcia sieci nn (rys. 2). Na rys. 2 przedstawiono fragment zarejestrowanego sygnału i_{10} , będącego prądem pobieranym przez OEE 10 (rys. 1) oraz i_{calc} wraz z oznaczeniem momentów t_{0k} oraz zliczeniem okresów 50 Hz. Kolejne momenty t_{0k} oznaczono czarnymi kwadratami, zaś kolejne okresy 50 Hz rozdzielono pionową linią. Zliczając okresy k od tego samego momentu t_{0k} dla sygnału napięcia zarejestrowanego na stanowiskach HF i MF można dokonać opisu stanu poszczególnych spośród 15 badanych OEE z dokładnością do 20 ms w oparciu o wartości sygnałów i_j , gdzie $j \in \langle 1, 15 \rangle$ zarejestrowane na stanowisku MF.

W oprogramowaniu stanowiska MF dla każdego okresu wyznaczone jest maksimum wartości syntetycznego sygnału i_{MF} , którego wartość kolejnych próbek jest sumą wartości kolejnych próbek z sygnałów i_j w poszczególnych okresach 50 Hz. Sposób wyznaczania sygnału i_{MF} opisano zależnością

$$i_{MF}(n) = \sum_{j=1}^{15} i_j(n), \text{ gdzie } n \in \langle 1, p \rangle. \quad (1)$$



Rys. 2. Sygnał i_{10} (linia ciągła) wraz z odfiltrowanym sygnałem u_0 (linia przerywana, góra) oraz i_{calc} (linia ciągła) wraz odfiltrowanym sygnałem u_{HF1} (linia przerywana, dół)

Fig. 2. Signal i_{10} (solid line) with filtered u_0 signal (dotted line, top) and i_{calc} (solid line) with filtered u_{HF1} signal (dotted line, bottom).

Rejestracja na stanowisku MF rozpoczyna się z opóźnieniem d względem stanowiska HF. W celu wyznaczenia opóźnienia d (wyrażonego jako liczba okresów 50 Hz) między zarejestrowanymi sygnałami $u_{HF2}(n)$ oraz $u_0(n)$, wyznacza się zbiory HF_{max} oraz MF_{max} zawierające maksymalne wartości sygnału prądów i_{calc} oraz i_{MF} zarejestrowane w kolejnych k okresach 50 Hz. Wyznaczenie opóźnienia d jest możliwe dzięki wyznaczonym w wyniku opisanej filtracji zbiorom t_{0HF} i t_{0MF} zawierającym indeksy kolejnych chwil t_{0k} dla sygnałów $u_{HF1}(n)$ oraz $u_0(n)$ ze stanowisk odpowiednio HF oraz MF. Sposób wyznaczania zbiorów HF_{max} oraz MF_{max} określono odpowiednio wzorami

$$HF_{max}(k) = \max(i_{calc}(n)),$$

$$\text{gdzie } n \in (t_{0HF}(k) - S_{NHF}, t_{0HF}(k)), k < 1, \left\lfloor \frac{p}{S_{NHF}} \right\rfloor, \quad (2)$$

$$MF_{max}(k) = \max(i_{MF}(n)),$$

$$\text{gdzie } n \in (t_{0MF}(k) - S_{NMF}, t_{0MF}(k)), k < 1, \left\lfloor \frac{p}{S_{NMF}} \right\rfloor. \quad (3)$$

Dla określonych wcześniej częstotliwości próbkowania liczba próbek na okres 50 Hz wynosi odpowiednio $S_{NHF} = 5000$ dla stanowiska HF oraz $S_{NMF} = 250$ dla stanowiska MF. Sygnał $u_{HF1}(n)$ ma nie mniej niż $p = k \cdot S_{NHF}$ próbek. W następnym kroku wyznaczane są zbiory $MF_{\max-diff}$ oraz $HF_{\max-diff}$ określające wartości różnic między kolejnymi elementami zbiorów MF_{\max} oraz HF_{\max} . Operacja ta ma na celu ekstrakcję tych fragmentów zbiorów MF_{\max} oraz HF_{\max} , które odpowiadają chwilom zmian stanu OEE. Sposób wyznaczenia tych zbiorów określono zależnościami

$$HF_{\max-diff}(k-1) = HF_{\max}(k) - HF_{\max}(k-1), \text{ gdzie } k \in \left\langle 2, \left\lfloor \frac{p}{S_{NHF}} \right\rfloor \right\rangle \quad (4)$$

oraz

$$MF_{\max-diff}(k-1) = MF_{\max}(k) - MF_{\max}(k-1),$$

$$\text{gdzie } k \in \left\langle 2, \left\lfloor \frac{p}{S_{NMF}} \right\rfloor \right\rangle. \quad (5)$$

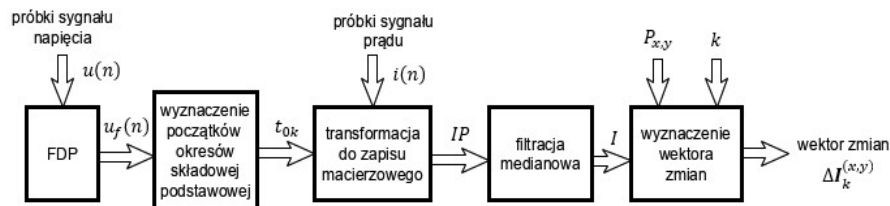
Narzędziem, które pozwala na wyznaczenie przesunięcia między dwoma szeregami czasowymi przesuniętymi o d próbek względem siebie jest korelacja krzyżowa, polegająca na obliczeniu funkcji współczynnika korelacji Pearsona dla tych dwóch szeregów czasowych. Indeks maksymalnej wartości w wyniku korelacji krzyżowej między tymi zbiorami jest zależny od wartości opóźnienia d między nimi. Odejmując liczbę pełnych okresów 50 Hz zawartych w sygnale $u_{HF1}(n)$ od indeksu maksymalnej wartości korelacji krzyżowej między zbiorami $MF_{\max-diff}$ oraz $HF_{\max-diff}$ otrzymuje się wartość opóźnienia d .

Dysponując wartością opóźnienia d między sygnałami $u_{HF1}(n)$ oraz $u_0(n)$ możliwe jest opisanie pomiarów HF stanami poszczególnych OEE. Można to zrealizować w oparciu o wartości próbek prądu i_j , gdzie $j \in \langle 1, 15 \rangle$ mierzone na poszczególnych gniazdkach, do których pojedynczo podłączone były badane OEE. Przekroczenie ustalonej wartości progowej przez któryś z sygnałów prądu i_j , gdzie $j \in \langle 1, 15 \rangle$ wskazuje na to, że nastąpiła zmiana stanu pracy OEE dołączonego do gniazdka opomiarowanego na kanale j . Wartość progowa jest eksperymentalnie ustalana dla każdego badanego OEE. W systemach NIALM zmianę stanu OEE traktuje się jako wystąpienie zdarzenia. Pośród badanych OEE znalazły się typowe urządzenia występujące w gospodarstwie domowym, m.in. telewizor, odkurzacz, żarówka, lampy LED, czajnik elektryczny czy kuchenka mikrofalowa. Dla każdego OEE zarejestrowano średnio blisko 160

zdarzeń. Oprogramowanie pozwala na opisanie stanu 15 OEE dla danych pomiarowych zarejestrowanych z częstotliwością próbkowania do 5 MHz. Do każdego zdarzenia przypisywane są również takie informacje jak liczba, rodzaj, czy moc odbiorników energii elektrycznej pracujących w tle. Taki opis pozwala na uwzględnienie wpływu tych czynników w badaniach nad wykorzystaniem poszczególnych algorytmów detekcji i identyfikacji zdarzeń spowodowanych zmianą stanu przez OEE. Dzięki danym pomiarowym pozyskanym dzięki przedstawionemu systemowi opracowano algorytm wyznaczania sygnatury prądowej OEE, opisany w rozdziale 4. Wyznaczone w ten sposób sygnatury są charakterystyczne dla poszczególnych OEE i pozwalają na ich rozpoznanie oraz na określenie stanu ich pracy.

4. WYZNACZANIE SYGNATURY PRĄDOWEJ OEE

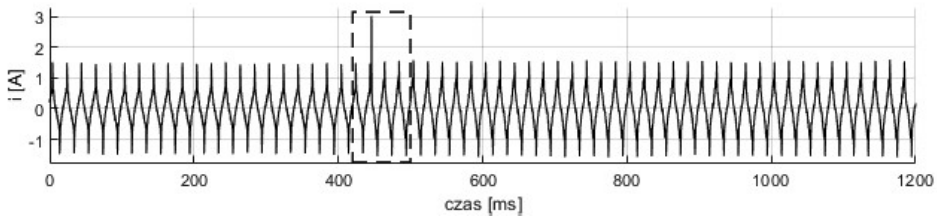
Podczas stabilnej pracy odbiornika energii elektrycznej można zaobserwować, że rejestrowane wartości chwilowe prądu są zbliżone w powtarzalnych chwilach (t_m) względem czasu przejścia sygnału składowej podstawowej napięcia sieci nn z wartości ujemnych do dodatnich t_{0k} . Jako k oznaczono numery kolejnych okresów składowej podstawowej sygnału napięcia sieciowego. W przypadku włączenia dodatkowego odbiornika, wyłączenia już włączonego odbiornika lub zmiany jego stanu wartości chwilowe prądu ulegają zmianie. Wartość tych zmian jest charakterystyczna dla danego typu odbiornika lub jego stanu. Poszczególne kroki potrzebne do wyznaczenia sygnatury zdarzenia, które miało miejsce w okresie numer k przedstawiono na rys. 3. Niezbędne do wyznaczenia sygnatury zdarzenia są wartości próbek sygnałów napięcia $u(n)$ oraz prądu $i(n)$ odpowiadające odpowiednio sygnałom $u_{calc}(t)$ oraz $i_{calc}(t)$ (por. rys. 2).



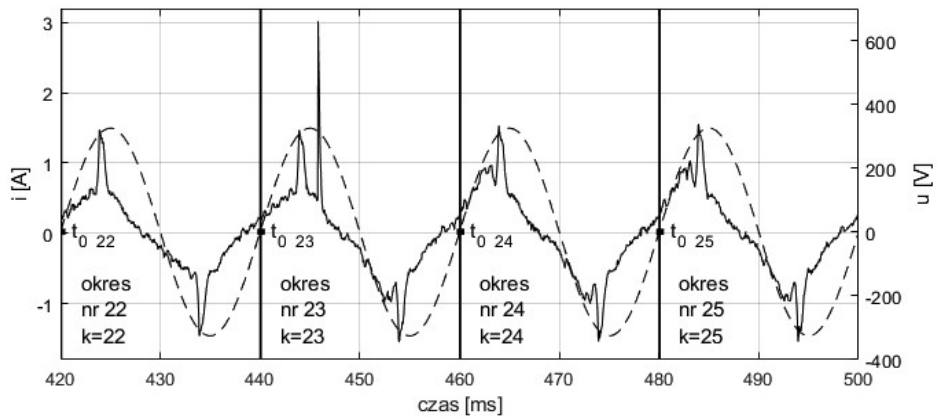
Rys. 3. Kolejne kroki wyznaczania sygnatury prądowej OEE
 Fig. 3. Steps of determining current signature of appliance

Istota proponowanej metody polega na wyznaczeniu różnicy wartości chwilowych sygnału prądu w odpowiednio wybranych okresach sygnału składowej podstawowej napięcia sieci nn mierzonych w chwilach t_m . Chwile t_m są wyznaczane dla każdego okresu napięcia sieci w identycznych odstępach czasu względem chwili przejścia sygnału składowej podstawowej napięcia sieci nn z wartości ujemnych do dodatnich t_{0k} (gdzie k to numery kolejnych okresów składowej podstawowej sygnału napięcia sieciowego). Chwile t_{0k} wyznaczane są na podstawie analizy sygnału $u_f(n)$ będącego wynikiem filtracji dolnoprzepustowej sygnału $u(n)$. Nominalna częstotliwość sieci elektrycznej w Europie, gdzie realizowane były pomiary, to 50 Hz. Nominalna częstotliwość sieci energetycznej w praktyce zmienia się w zakresie setnych części Hz [5]. Z tego powodu nie wystarczy wyznaczyć raz t_0 i przyjąć, że następny moment t_0 wystąpi za $f_s/50$ próbek, gdzie jako f_s oznaczona jest częstotliwość próbkowania. Aby poprawnie wyznaczyć momenty t_{0k} należy poddać sygnał napięcia $u(n)$ filtracji dolnoprzepustowej (FDP na rys. 3). W zaimplementowanej realizacji wykorzystano do tego celu filtr dolnoprzepustowy o paśmie zaporowym powyżej częstotliwości 70 Hz. Należy zaznaczyć, że proponowaną metodę można zastosować również w sieci nn o częstotliwości 60 Hz zmieniając wartości parametrów charakterystycznych proporcjonalnie w odniesieniu do częstotliwości 50 Hz. Na rys. 4a przedstawiono sygnał prądu obejmujący chwilę włączenia kinkietu z 4 lampami LED. Sposób wyznaczania sygnatury OEE zostanie zobrazowany na przykładzie sygnału prądu przedstawionego na rys. 4a. Na rys. 4b przedstawiono powiększenie fragmentu rys. 4a zaznaczonego linią przerywaną. Na rys. 4b oznaczono chwile t_{0k} , w których sygnał napięcia (linia przerywana) $u_f(n)$ zmienia znak z ujemnego na dodatni. Chwile te wyznaczają początki kolejnych okresów oznaczonych jako k . W trakcie trwania okresu $k=23$ został włączony kinkiet z 4 lampami LED. Znajomość chwil t_{0k} pozwala na przekształcenie zebranych wartości próbek sygnału prądu $i(n)$ do macierzy IP , którą można opisać zależnością:

$$\begin{array}{c}
 \begin{matrix} \leftarrow & & & & & & \rightarrow \\ k=\text{numer okresu} & & & & & & \\ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{ccccccc}
 \text{IP}(1,1) & \text{IP}(1,2) & \text{IP}(1,3) & \dots & \text{IP}(1,K-2) & \text{IP}(1,K-1) & \text{IP}(1,K) \\
 \text{IP}(2,1) & \text{IP}(2,2) & \text{IP}(2,3) & \dots & \text{IP}(2,K-2) & \text{IP}(2,K-1) & \text{IP}(2,K) \\
 \text{IP}(3,1) & \text{IP}(3,2) & \text{IP}(3,3) & \dots & \text{IP}(3,K-2) & \text{IP}(3,K-1) & \text{IP}(3,K) \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \text{IP}(M-2,1) & \text{IP}(M-2,2) & \text{IP}(M-2,3) & \dots & \text{IP}(M-2,K-2) & \text{IP}(M-2,K-1) & \text{IP}(M-2,K) \\
 \text{IP}(M-1,1) & \text{IP}(M-1,2) & \text{IP}(M-1,3) & \dots & \text{IP}(M-1,K-2) & \text{IP}(M-1,K-1) & \text{IP}(M-1,K) \\
 \text{IP}(M,1) & \text{IP}(M,2) & \text{IP}(M,3) & \dots & \text{IP}(M,K-2) & \text{IP}(M,K-1) & \text{IP}(M,K)
 \end{array} \right] \\
 \downarrow \\
 m=\text{numer próbki w okresie}
 \end{array} & (6)
 \end{array}$$



(a)



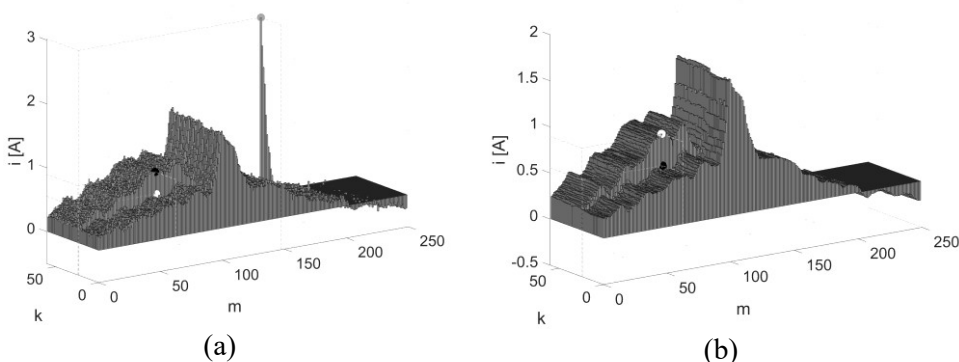
(b)

Rys. 4. Przykładowy fragment zarejestrowanych 60 okresów sygnału prądu i z wyróżnionym fragmentem 4 okresów obejmujących włączenie kinkietu z 4 lampami LED (a) oraz powiększenie wyróżnionego fragmentu (b).

Fig. 4. An example of recorded current signal (a). During recording a sponse with 4 LED lamps was turned on (b, period number 23).

Poszczególne wiersze macierzy IP odpowiadają wartościom chwilowym prądu, które wystąpiły w takim samym odstępie czasu względem momentu t_0 w okresach $k=1,2,\dots,K-1,K$. Indeks k wskazuje numer okresu składowej podstawowej sygnału napięcia w sieci energetycznej, zaś indeks m numer próbki w tym okresie. Pojedynczy okres ma M próbek, gdzie M to liczba naturalna, odpowiadająca liczbie próbek zarejestrowanych podczas trwania jednego okresu (20 ms) składowej podstawowej napięcia sieci energetycznej (50 Hz) dla wykorzystywanej w przykładzie częstotliwości próbkowania $f_s = 24900$ Hz. Poszczególne kolumny zawierają, więc próbki które zostały zarejestrowane w k -tym okresie (składowej podstawowej 50 Hz). Macierz ma $f_s/50$ wierszy, czyli dla wykorzystywanej f_s liczba wierszy macierzy IP wynosi $\frac{24900 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 498$.

W kolejnym kroku wszystkie wiersze macierzy IP są poddawane filtracji, w wyniku czego otrzymywana jest macierz I . Korzystnym jest zastosowanie filtracji medianowej rzędu $n=15$. Filtracja medianowa rzędu n polega na wyznaczeniu mediany ruchomej, dla okna o szerokości n na wartościach próbek wzdłuż wierszy macierzy IP . Na rys. 5a pokazano pierwszych 250 próbek każdego wiersza macierzy IP , zaś rys. 5b macierzy I . Odpowiada to pierwszym połowom kolejnych okresów sygnału prądu sygnału przedstawionego na rys. 4a.



Rys. 5. Przykład zmian wartości prądu opisanego macierzą IP (a) oraz macierzą I (b) dla wybranego czasu, w którym włączono OEE.
 Fig. 5. An example of changes in the current signal described by the matrix IP (a) and matrix I (b) for selected time in which the device was turned on.

Porównując rys. 5a oraz rys. 5b można zauważyć efekt zastosowania filtracji medianowej. Na rys. 5a szarym kołem oznaczono szczytową wartość chwilową sygnału prądu z okresu numer 23, którą zarejestrowano na krótko po włączeniu urządzenia. Filtracja medianowa wyeliminowała ten chwilowy skok, a także obniżyła poziom zaszumienia obrazowanego sygnału.

Porównując wartości m -tych próbek w okresie $k=23$ z wartościami m -tych próbek w okresie $k=24$ można zaobserwować zmiany wartości chwilowych sygnału prądu mogące świadczyć o zmianie stanu przez któryś z OEE. Punktem białym oznaczono przykładową próbkę sygnału w okresie $k=23$, zaś czarnym próbkę w okresie $k=24$.

W ostatnim kroku wyznaczany jest wektor zmian $\Delta I_k^{(x,y)}$. W celu wyznaczenia wektora zmian $\Delta I_k^{(x,y)}$, które zaszły w sygnale w wyniku zmiany stanu przez OEE, która miała miejsce w okresie numer k , należy odjąć odpowiadające wartości próbek macierzy I z okresu przed zmianą stanu OEE (okres k'') od wartości próbek macierzy I z okresu zarejestrowanego po analizowanej zmianie stanu (okres k').

Proponowana metoda zakłada, że OEE, który zmienił stan w trakcie trwania odejmowanych okresów jest już w stanie ustalonym. Wartość m -tej próbki w k -tym okresie oznacza się jako $i_{m,k}$. Wartość różnicy między wartościami m -tych próbek z okresu $k'=k+P_{x,y}$ i okresu $k''=k-P_{x,y}$ oznaczono jako $\Delta i_{m,k}$ i oblicza się według wzoru

$$\Delta i_{m,k} = i_{m,k+P_{x,y}} - i_{m,k-P_{x,y}}. \quad (7)$$

Jako $P_{x,y}$ oznacza się liczbę okresów sygnału o częstotliwości 50 Hz między okresami o numerach k i k' oraz k i k'' . Wartość $P_{x,y}$ jest charakterystyczna dla OEE o numerze porządkowym x , gdzie:

$$x \in N \wedge x \in \langle 1, X \rangle,$$

$$y \in \{ON, OFF\}.$$

Wartość X to liczba OEE, które mają być rozpoznawane przy wykorzystaniu proponowanej metody. Wartość $P_{x,y}$ powinna być tak dobrana, aby w przypadku gdy k' jest okresem występującym przed zmianą stanu OEE to okres k'' jest okresem po zmianie stanu OEE. Wartość $P_{x,y}$ wyznaczana jest doświadczalnie.

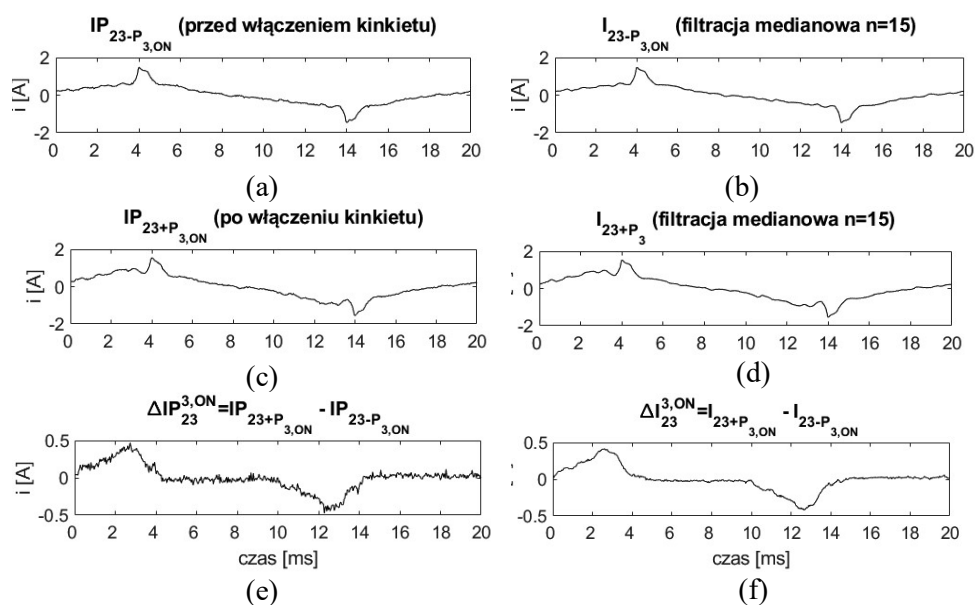
Wektor próbek I_k odpowiadający k -temu okresowi sygnału prądu można określić jako

$$I_k = [i_{i,k}, i_{m,k}, i_{M,k}]. \quad (8)$$

Dysponując definicją $\Delta I_{m,k}$ oraz I_k możliwe jest zdefiniowanie wektora zmian ΔI_k określonego wzorem

$$\Delta I_k^{(x,y)} = I_{k+P_{x,y}} - I_{k-P_{x,y}}, \text{ dla } k \in N \wedge k \in \langle P_{x,y} + 1, K - P_{x,y} \rangle. \quad (9)$$

Wektor zmian $\Delta I_k^{(x,y)}$ jest jednocześnie wektorem cech, na podstawie którego rozpoznawana jest zmiana stanu (oznaczona jako y) OEE o numerze porządkowym x poprzez porównanie z wzorcowymi wektorami cech $\Delta I_{wzor}^{(x,y)}$ wszystkich OEE w danym obwodzie elektrycznym. Wzorcowe wektory cech $\Delta I_{wzor}^{(x,y)}$ uzyskuje się w wyniku eksperymentów polegających na identycznych pomiarach i operacjach przetwarzania danych jak przy wyznaczaniu wektora



Rys. 6. Wyznaczenie wektora zmian $\Delta IP_k^{(x,y)}$ na sygnale niefiltrowanym (a,c,e) oraz wektora zmian $\Delta I_k^{(x,y)}$ na sygnale poddanym filtracji medianowej 15. rzędu dla: $k=23$, $x=3$, $y=ON$ (b,d,f).

Fig. 6. Calculation of the vector of changes $\Delta IP_k^{(x,y)}$ on unfiltered signal (a,c,e) and vector of changes $\Delta I_k^{(x,y)}$ on signal filtered with 15th order median filter dla $k=23$, $x=3$, $y=ON$ (b,d,f).

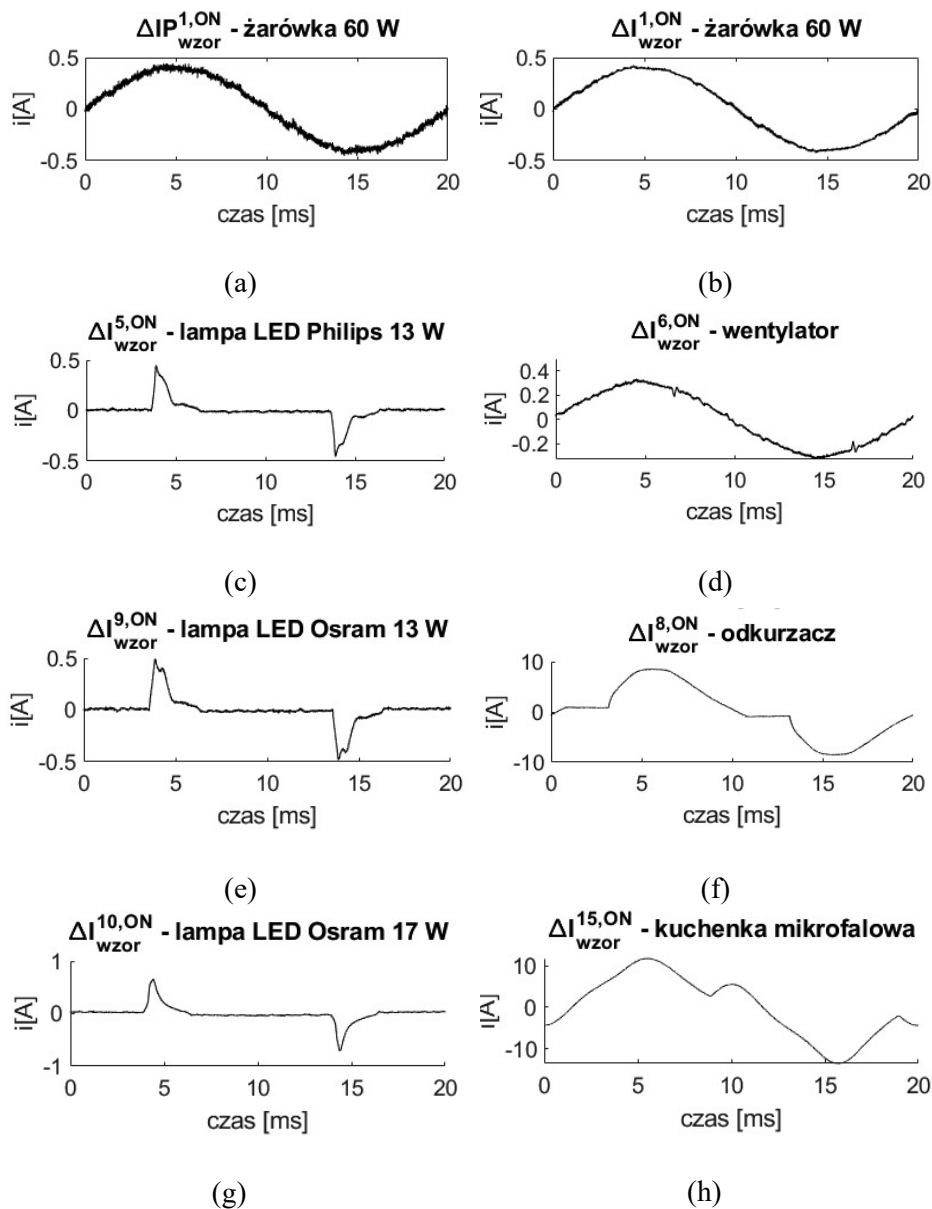
zmian $\Delta I_k^{(x,y)}$. Na rys. 6. przedstawiono wyznaczenie wektorów zmian $\Delta IP_k^{(x,y)}$ dla sygnału przedstawionego na rys. 5a oraz $\Delta I_k^{(x,y)}$ dla sygnału przedstawionego na rys. 5b. Zmiana stanu miała miejsce w okresie $k=23$, a włączony został kinkiet z lampami LED ($x=3$, $y=ON$). Można zauważyć, iż dzięki zastosowaniu filtracji medianowej wyznaczony wektor zmian $\Delta I_{23}^{(3,ON)}$ (rys. 6f) ma istotnie gładszy przebieg niż wektor zmian $\Delta IP_{23}^{(3,ON)}$ (rys. 6e).

Warto też podkreślić, że podczas analizowanego zdarzenia w tle pracowało 7 innych OEE. W literaturze zauważono problem pogarszania skuteczności rozpoznawania wraz ze wzrostem liczby OEE pracujących w tle w czasie rozpoznawanego zdarzenia [6][7][8].

Należy zauważyć, że spotykane są w publikacjach [9] opisy badań w których sygnatury są przygotowywane dla każdej możliwej konfiguracji rozpoznawanych urządzeń. W proponowanej metodzie do utworzenia sygnatury umożliwiającej rozpoznawanie danego OEE w dowolnej konfiguracji urządzeń pracujących w tle wystarczy jedna wzorcowa obserwacja zmiany stanu przez dane urządzenie. Warto zauważyć, że dla przykładowego zdarzenia (rys. 4, rys. 5), stan nieustalony trwa mniej niż 1 okres napięcia sieci i proponowany sposób umożliwi rozpoznanie zmiany stanu tego OEE już po przetworzeniu następnego pełnego okresu, po okresie w którym nastąpiła zmiana stanu. Dla innych OEE stany przejściowe mogą trwać znacząco dłużej. Wzorcowe wektory zmian $\Delta I_{wzor}^{(x,y)}$ dla włączeń wybranych OEE przedstawiono na ,

Rys. 7b-h. Wektory te wyznaczono z macierzy I , będącej wynikiem filtracji medianowej 15-go rzędu macierzy IP wzdłuż wierszy. Warto zwrócić uwagę na bardzo duże podobieństwo wektorów zmian OEE o ID 5,ON (LED Philips 13 W – rys. 7c) oraz i ID 9,ON (LED Osram 13 W - rys. 7e).

Na rys. 7a przedstawiono wzorcowy wektor zmian $\Delta IP_{wzor}^{(1,ON)}$ w celu porównania z wektorem $\Delta I_{wzor}^{(1,ON)}$ (rys. 7b). Można zauważyć, że transformacja sygnału do macierzy, a następnie przefiltrowanie jej wzdłuż wierszy, pozwoliło na istotne uwypuklenie tych składowych sygnału, które są charakterystyczne dla poszczególnych urządzeń. Przekłada się to wprost na jakość uzyskanej sygnatury.



Rys. 7. Zestawienie wzorcowych wektorów dla wybranych OEE.
 Fig. 7. Vectors of changes for selected appliances.

5. PODSUMOWANIE

Modyfikując oprogramowanie dostępnego stanowiska pomiarowego uzyskano możliwość pozyskiwania dokładnie opisanych danych pomiarowych na potrzeby badań algorytmów dla systemów NIALM. System umożliwia śledzenie stanu 15 OEE z rozdzielczością czasową 20 ms oraz rejestrację sygnałów napięcia oraz prądu z częstotliwością próbkowania do 5 MHz. Dane pozyskane dzięki opisanemu systemowi pozwoliły na utworzenie bazy ponad 2200 zdarzeń (włączeń i wyłączeń OEE). W oparciu o analizy utworzonej bazy opracowano algorytm wyznaczania sygnatur prądowych OEE. Wyznaczone sygnatury umożliwiają rozróżnienie stanu pracy OEE. Wykorzystując okresowość sygnału napięcia w sieci niskiego napięcia zrealizowano macierzowy zapis sygnału prądu. Zapis macierzowy umożliwia zastosowanie filtracji wzdłuż wierszy, co pozwala na uwypuklenie składowych sygnału charakterystycznych dla poszczególnych OEE

Planowane są dalsze prace nad poprawą własności funkcjonalnych opracowanego systemu. Rozważana jest m. in. zmiana sposobu synchronizacji obu stanowisk polegająca na wykorzystaniu synchronizacji sprzętowej. Taką synchronizację umożliwiają wejścia kanałów pomiarowych kart akwizycji po odpowiedniej konfiguracji. Inną rozważaną możliwością jest wykorzystanie protokołu PTP do synchronizacji zegarów komputerów na obu (HF i MF) stanowiskach pomiarowych. Zmiana sposobu synchronizacji zwolni zasoby obliczeniowe wykorzystywane obecnie na programową synchronizację danych pomiarowych. Zastosowanie synchronizacji sprzętowej lub sieciowej umożliwi bezpośredni opis stanów poszczególnych OEE już w trakcie procesu akwizycji danych na stanowisku MF. Tym samym nie będzie już potrzebna programowa analiza wartości próbek prądu rejestrowanego na tym stanowisku. W przyszłości przewidywane jest znaczne rozszerzenie oraz udostępnienie tworzonej bazy zdarzeń społeczności skupionej wokół zagadnień z obszaru badawczego NIALM.

LITERATURA

1. Bilski P., Wójcik A.: Metoda Selekcji cech sygnałów prądowo-napięciowych w nieinwazyjnej identyfikacji odbiorników energii elektrycznej, Łagów, 2016
2. Carrie Armel, K., Gupta, A., Shrimali, G., and Albert: A. Is disaggregation the holy grail of energy efficiency? The case of electricity. *Energy Policy* 52, 2012
3. Pereira L., Nunes N., Performance evaluation in non-intrusive load monitoring: Datasets, metrics, and tools – A review, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2018
4. Wójcik A. , Łukaszewski R., Kowalik R. , Winiecki W.: Nonintrusive Appliance Load Monitoring: An Overview Laboratory Test Results and Research Directions, *Sensors*, 2019
5. K. Oziemblewski and K. Opala, Kołysania mocy Static stability of electric power systems *Power swings*, pp. 632–637, 2015.
6. B. Liu, W. Luan, and Y. Yu, Dynamic time warping based non-intrusive load transient identification, *Applied Energy*, vol. 195, pp. 634–645, 2017
7. Q. Wu and F. Wang, Concatenate convolutional neural networks for non-intrusive load monitoring across complex background, *Energies*, vol. 12, no. 8, 2019.
8. D. Egarter, V. P. Bhuvana, and W. Elmenreich, PALDi: Online load disaggregation via particle filtering, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 2, pp. 467–477, 2015,
9. W. A. K. Dhananjaya, R. M. M. R. Rathnayake, S. C. J. Samarathunga, C. L. Senanayake, and N. Wickramarachchi, Appliance-level demand identification through signature analysis, *MERCon 2015 - Moratuwa Eng. Res. Conf.*, pp. 70–75, 2015.