

## Opis odbiorników energii elektrycznej z wykorzystaniem pomiarów sygnału prądu w stanach przejściowych

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono propozycję zastosowania stanów przejściowych w sygnałach prądowych do opisu odbiorników energii elektrycznej. Nowa metoda opisu posłużyła do zaprojektowania nowego algorytmu identyfikacji odbiorników energii w systemach NIALM. Opisano stanowisko pomiarowe wykorzystane do badania stanów przejściowych pochodzących od urządzeń elektrycznych. Przedstawiono eksperymenty mające na celu zaobserwowanie i poprawną akwizycję sygnału prądu w momencie włączenia urządzenia oraz uzyskane rezultaty.

**Abstract.** The article presents the proposition of applying transient states in current signals for electrical appliances characterization. The main purpose of the new characterization method is to develop the new algorithm of electrical appliances identification in NIALM system. The paper presents the measurement setup used to explore transient states generated by electrical appliances. Experiments performed to observe and correctly acquire current signal when the device is turned on are described. Some experimental results are presented. (**Description of electrical appliances basing on current signal measurements in transient states**).

**Słowa kluczowe:** stan przejściowy, NIALM, sygnatury urządzeń elektrycznych, rozkład zużycia energii elektrycznej.

**Keywords:** transient state, NIALM, signatures of electrical appliances, disaggregation of electricity consumption.

### Wstęp

Wobec wciąż rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną, konieczne jest podjęcie działań, które umożliwią nie tylko bezpośrednie ograniczenie jej zużycia, ale również pozyskanie informacji o tym gdzie i kiedy zużywa się najwięcej energii, aby podnieść świadomość odbiorców energii [1]. Nieinwazyjny system monitorowania zużycia energii elektrycznej (NIALM – Non-Intrusive Appliance Load Monitoring) opisany po raz pierwszy w [2], jest propozycją odpowiedzi na tak postawiony problem. System NIALM dokonuje rozkładu całkowitego zużycia energii elektrycznej na poszczególne odbiorniki na podstawie dokładnych pomiarów prądu [3], napięcia [4] lub mocy [5], w jednym punkcie monitorowanego obszaru, zlokalizowanym najczęściej w okolicy licznika energii elektrycznej. Dane pomiarowe są następnie przetwarzane za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji [6], dokonujących rozkładu zużycia energii elektrycznej na poszczególne odbiorniki poprzez przypisanie każdemu z nich właściwego stanu pracy [7]. Rozkład energii elektrycznej dokonywany jest najczęściej poprzez klasyfikację przyrostu zużycia energii [8], w oparciu o sygnatury monitorowanych urządzeń. W tym celu wykorzystywane są sygnatury monitorowanych odbiorników energii elektrycznej przygotowane podczas procesu trenowania systemu [9]. Ze względu na metodę działania wśród systemów NIALM można wyróżnić te wykorzystujące stany ustalone oraz analizujące stany przejściowe [10]. Klasyfikacji NIALM dokonuje się często także ze względu na częstotliwość próbkowania mierzonych sygnałów [11]. Większość opracowanych dotychczas metod charakteryzacji odbiorników wykorzystuje wartości parametrów sygnałów pomiarowych uzyskane przy niskiej częstotliwości próbkowania (<50 S/s) oraz cechy urządzenia określone w ustalonym stanie pracy.

### Stan przejściowy

Wiele urządzeń, m.in. te wyposażone w silniki elektryczne oraz zasilacze impulsowe, podczas włączenia generuje krótkotrwały udar prądu – stan nieustalony, przekraczający od kilku do kilkudziesięciu razy wartość prądu w stanie ustalonym. Zjawisko to opisano między innymi w [12]. Szereg eksperymentów przeprowadzonych podczas badań metod NIALM w laboratorium Instytutu Radioelektroniki i Technik Multimedialnych PW wskazuje, że wystąpienie stanu przejściowego jest związane ze zmianą stanu urządzenia, a przede wszystkim

z dołączeniem odbiornika energii do sieci energetycznej. Innymi słowy, stan przejściowy jest to gwałtowna, skokowa zmiana impedancji obciążenia sieci, wywołująca krótkotrwały przepływ prądu o amplitudzie znacznie wyższej niż podczas ustalonej pracy urządzenia. Wielkość udaru prądu jest zależna od wielu czynników. Wpływ na jego amplitudę ma, między innymi konstrukcja urządzenia oraz faza napięcia, w której urządzenie zostało dołączone do sieci zasilającej.

### Opis problemu badawczego

Opracowane do tej pory systemy NIALM nie pozwalają na uzyskanie bezbłędnej identyfikacji wszystkich odbiorników energii elektrycznej wykorzystywanych w gospodarstwach domowych, pomimo stosowania złożonych algorytmów sztucznej inteligencji [13]. Dla niektórych grup odbiorników energii elektrycznej zużycie energii jest szacowane bardzo dokładnie. Nie ma jednak rozwiązania kompleksowego, obejmującego wszystkie typy urządzeń ze szczególnym uwzględnieniem urządzeń małej mocy, których zmiany stanów ze względu na niewielkie zużycie energii są trudne do wykrycia. Kluczowym dla prawidłowego działania algorytmów identyfikacji jest opisanie przebiegów związanych z pracą urządzenia za pomocą takiego zestawu parametrów (np. wektora liczb), który będzie przyjmował unikalną, powtarzalną wartość dla każdego z testowanych urządzeń. Z tego powodu istnieje potrzeba dokładniejszej analizy sygnałów elektrycznych związanych z pracą urządzeń w poszukiwaniu takich cech tych sygnałów, które umożliwiłyby ich jednoznaczną identyfikację za pomocą wartości parametrów liczbowych. Potencjalnym źródłem informacji o odbiornikach energii elektrycznej są sygnały elektryczne występujące w chwilach ich włączeń (stanach przejściowych) [14]. Ze względu na niewielką liczbę publikacji opisujących wykorzystanie tego zjawiska w systemach NIALM [15], zdecydowano się na przeprowadzenie badań stanów przejściowych pod kątem wykorzystania do charakteryzowania odbiorników energii elektrycznej. Założono, że przy zastosowaniu odpowiedniej metody rejestracji sygnałów oraz właściwej metody analizy jest możliwa identyfikacja urządzeń elektrycznych na podstawie cech stanów przejściowych. Badania opisane w dalszej części artykułu miały na celu:

- poprawną rejestrację sygnałów prądu i napięcia występujących w stanach przejściowych,
- opisanie sygnałów za pomocą parametrów liczbowych umożliwiających porównanie wielu sygnałów

zarejestrowanych dla różnych urządzeń,

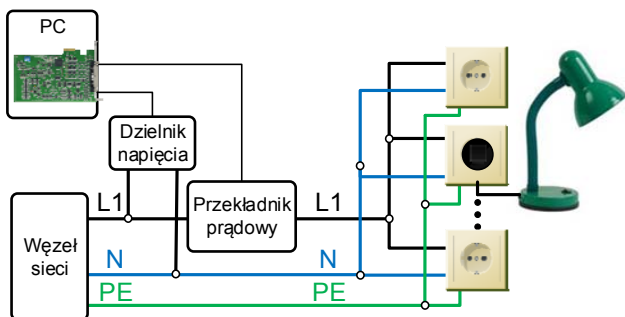
- sprawdzenie, czy parametry sygnałów w stanach przejściowych są powtarzalne podczas kolejnych załączeń jednego urządzenia, oraz różne dla urządzeń różnych typów.

Kolejne części artykułu w sposób chronologiczny opisują cztery przeprowadzone eksperymenty:

- I. Rejestracje prądów i napięć, wyznaczenie cech charakterystycznych dla  $f_s = 2$  kHz (LF);
- II. Rejestracje prądów i napięć, wyznaczenie cech charakterystycznych dla  $f_s = 2$  MHz (MF);
- III. Weryfikacja poprawności działania stanowiska laboratoryjnego;
- IV. Rejestracje prądów, wyznaczenie cech charakterystycznych dla  $f_s = 20$  MHz (HF).

### Stanowisko pomiarowe

Stanowisko do badań stanów przejściowych przedstawiono na Rys. 1. Urządzenia elektryczne dołączane były do gniazdek w specjalnie przygotowanej sieci laboratoryjnej. Do pomiaru prądu wykorzystano przekładnik prądowy SCT-013-020. Rejestracji przebiegów dokonywano za pomocą karty akwizycji Advantech PCIE-1744 zainstalowanej w komputerze PC. Opracowane oprogramowanie obsługujące proces akwizycji umożliwia wygodny zapis wektorów danych do plików i dalsze przetwarzanie w środowisku Matlab.



Rys. 1. Stanowisko laboratoryjne do badań stanów przejściowych.

### Rejestracje z niską częstotliwością próbkowania (LF)

W początkowych eksperymentach, akwizycję stanów przejściowych wykonywano z częstotliwością próbkowania wynoszącą  $f_s = 2$  kHz. Zarejestrowano sygnały prądu i napięcia zawierające stany przejściowe dla kilku urządzeń AGD: odkurzacza, sokowirówki, telewizora, wentylatora, żarówki LED i nawilżacza powietrza. Eksperyment zaplanowano w taki sposób, że po uruchomieniu rejestracji urządzenie włączano na kilka sekund, następnie wyłączano, oczekiwano aż praca urządzenia wygaśnie (np. zatrzyma się silnik odkurzacza) i ponownie włączano urządzenie. Przykład przebiegu prądu podczas kilkukrotnego uruchamiania odkurzacza przedstawiono na Rys. 2. Przebieg pokazano w dwóch powiększeniach w sensie skali czasu (przebieg górny - sekundy, przebieg dolny - dziesiątki milisekund).

W celu wyznaczenia wzorca z zarejestrowanych przebiegów prądu i napięcia zasilania, wybrano te chwile czasu, w których występują stany przejściowe wynikające z włączenia urządzeń. Opracowano procedurę wyszukiwania stanów przejściowych składającą się z czterech kroków:

- a) Wyznaczenie wartości skutecznej za okres ( $I_{RMS}$ ) dla całego przebiegu sygnału.
- b) Wyselekcjonowanie wartości pochodnej (1) w chwilach  $n$ , dla których spełnione jest kryterium (2)

$$(1) I'_{RMS} = \frac{dI_{RMS}}{dt},$$

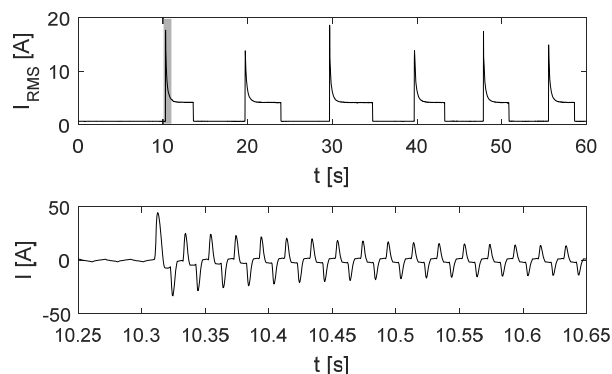
$$(2) I'_{RMS}(n) > 3\sigma,$$

gdzie:  $\sigma$  – odchylenie standardowe pochodnej  $I'_{RMS}$ .

c) Eliminacja punktów dla których wartości pochodnej są mniejsze od wartości progowej TH.

d) Wybranie lokalnych maksimum spośród wyselekcjonowanych punktów.

Ustalone wartości progowe zostały dobrane empirycznie na podstawie analizy zarejestrowanych przebiegów. W kolejnym etapie przetwarzania wyznaczono sygnaturę każdego urządzenia składającą się z 30. parametrów opisujących kształt sygnału prądu. Parametrami sygnatury były m.in.: maksymalna wartość RMS prądu, czas trwania stanu przejściowego, nachylenie zbocza narastającego i zbocza opadającego, całka za czas trwania stanu przejściowego.



Rys. 2. Przebieg prądu podczas włączania odkurzacza.

Uzyskane wyniki analiz dokonywanych z wykorzystaniem wspomnianych sygnatur nie spełniły oczekiwań. Po pierwsze parametry dla różnych przykładów stanu przejściowego tego samego urządzenia przyjmowały odmienne wartości. Co więcej, wartości parametrów znajdowały się w tym samym zakresie dla różnych urządzeń. Przeprowadzona analiza wyników wskazuje na to, że stany przejściowe widoczne w sygnale prądu zarejestrowanego z częstotliwością próbkowania  $f_s = 2$  kHz nie dają powtarzalnych wyników w zbiorze wybranych sygnatur i nie mogą być w związku z tym wykorzystane do charakteryzowania urządzeń elektrycznych.

### Rejestracje ze średnią częstotliwością próbkowania (MF)

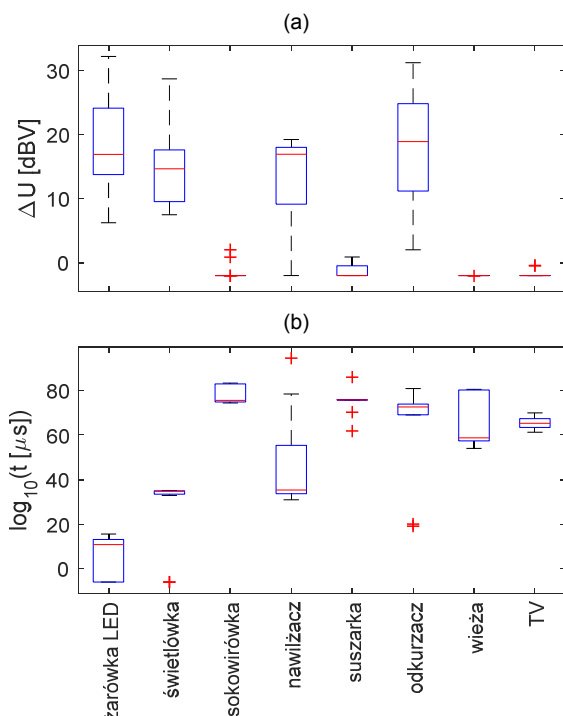
Podczas kolejnego eksperymentu wykorzystano częstotliwość próbkowania  $f_s = 2$  MHz. Stany przejściowe rejestrowano tak, jak to opisano w poprzedniej części niniejszego artykułu, jednak czas analizy został ograniczony do kilkudziesięciu  $\mu s$  występujących w pobliżu chwili włączenia urządzeń.

Zaobserwowano, że dla niektórych urządzeń, np. dla żarówki LED, widoczne są zmiany kształtu sygnału napięcia w chwili wystąpienia stanu przejściowego w sygnale prądu (spowodowanego włączeniem wspomnianych urządzeń). W związku z tym rejestrowano sygnały prądu i napięcia, a następnie przetwarzano je z wykorzystaniem tego samego algorytmu. Wyznaczono następujące cechy sygnałów prądu i napięcia:

- maksymalna wartość chwilowa,
- maksymalna różnica wartości sąsiednich próbek,
- maksymalna zmiana między sąsiednimi próbkami,
- czas trwania stanu przejściowego przy poziomie odcięcia 90%, 80%, 70%, 60% i 50%.

Obliczone parametry w zdecydowanej większości nie

pozwołyły uzyskać oczekiwanych rezultatów. Jedyne parametry, które pozwalają wyróżnić pewną grupę urządzeń to czas trwania stanu przejściowego dla poziomu odcięcia 50% (cecha sygnału prądu) oraz maksymalna różnica wartości sąsiednich próbek (cecha sygnału napięcia). Wymienione cechy przedstawiono na wykresach skrzynkowych na Rys. 3. Maksymalna różnica wartości sąsiednich próbek (Rys. 3a) pozwala na wyróżnienie dwóch grup urządzeń. Pierwsza z nich to urządzenia, których załączenie powoduje wyraźne krótkotrwałe zmiany wartości napięcia. Do tej grupy należą: urządzenia oświetleniowe, nawilżacz i odkurzacz. Druga grupa to urządzenia, dla których nie zarejestrowano wyraźnych zmian napięcia w stanie przejściowym. Z kolei czas trwania stanu przejściowego (Rys. 3b) przyjmuje wartości w unikalnym zakresie wyłącznie dla żarówki LED. Przeprowadzony eksperyment wskazuje, że stany przejściowe zostały zarejestrowane w niewłaściwy sposób lub też zastosowano nieodpowiednie metody analizy sygnałów prądów i napięć.



R  
stanów przejściowych: maksymalna chwilowa zmiana napięcia (a), czas trwania stanu przejściowego w sygnale prądu przy poziomie odcięcia 50% (b).

### Weryfikacja poprawności działania stanowiska laboratoryjnego

Podczas eksperymentów zaobserwowano, że różnica pomiędzy sąsiednimi próbkami prądu jest znacznie większa niż kwant przetwornika. W związku z tym przeprowadzono weryfikację poprawności działania stanowiska laboratoryjnego. W pierwszej kolejności sprawdzono działanie systemu akwizycji wraz z okablowaniem, a następnie do wejścia karty akwizycji dołączono generator sygnału prostokątnego. Karta akwizycji poprawnie odwzorowuje zbrocza sygnału prostokątnego.

W kolejnym kroku sprawdzono, czy przekładniki prądowe prawidłowo odwzorowują zbrocza sygnału. W tym celu do oscyloskopu cyfrowego dołączono sondę pola bliskiego. Sondę ułożono wzdłuż przewodów zasilających badane urządzenie, np. lampkę. Obserwowano napięcie indukowane na zaciskach sondy podczas uruchamiania urządzeń. Zaobserwowano, że stan przejściowy zawiera składowe w różnych zakresach częstotliwości, w tym między innymi sygnał o częstotliwości kilku MHz.

### Rejestracje z wysoką częstotliwością próbkowania (HF)

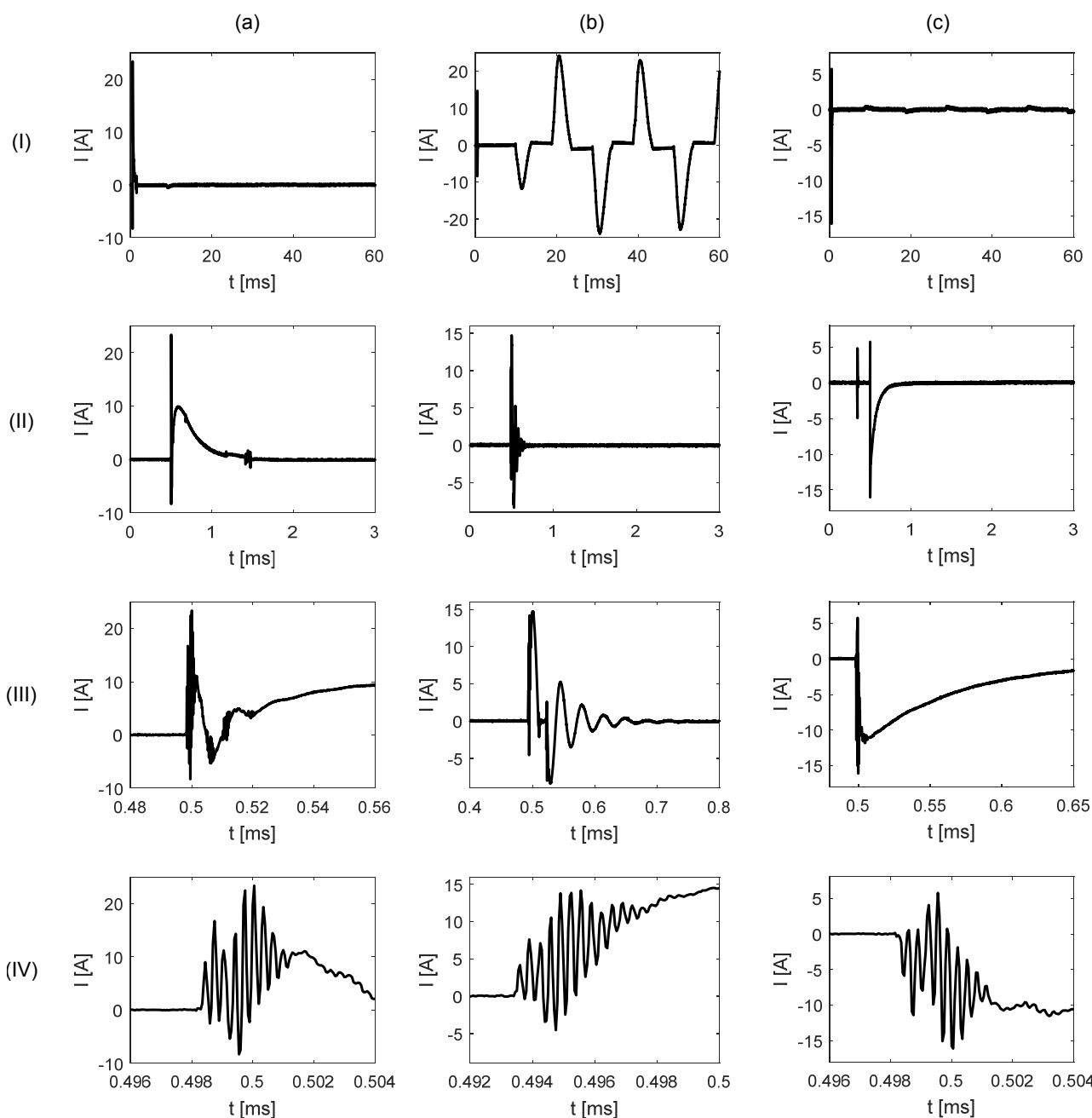
Zrealizowano oprogramowanie w środowisku LabVIEW umożliwiające rejestrację sygnałów z częstotliwością  $f_s = 20$  MHz. Ze względu na ograniczenia sprzętowe karty akwizycji, rejestracja sygnałów dla tej częstotliwości próbkowania jest możliwa tylko dla jednego kanału karty akwizycji, wobec czego obserwowano wyłącznie sygnał prądu. Dla każdego z badanych urządzeń zarejestrowano 40 przebiegów prądu w stanie przejściowym. Na Rys. 4 przedstawiono przebiegi prądu (a) żarówki LED, (b) odkurzacza oraz (c) świetlówek. Każdy ze stanów przejściowych przedstawiono w czterech różnych skalach czasu: (I) – dziesiątki ms, (II) – pojedyncze ms, (III) – ułamki ms oraz (IV) – pojedyncze  $\mu$ s. Następnie, dla przybliżenia (II) oraz (III) oszacowano częstotliwość dominujących, quasi okresowych oscylacji sygnału. Wyniki uzyskane dla kilku przykładów przebiegów zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Oszacowane częstotliwości wybranych segmentów stanów przejściowych

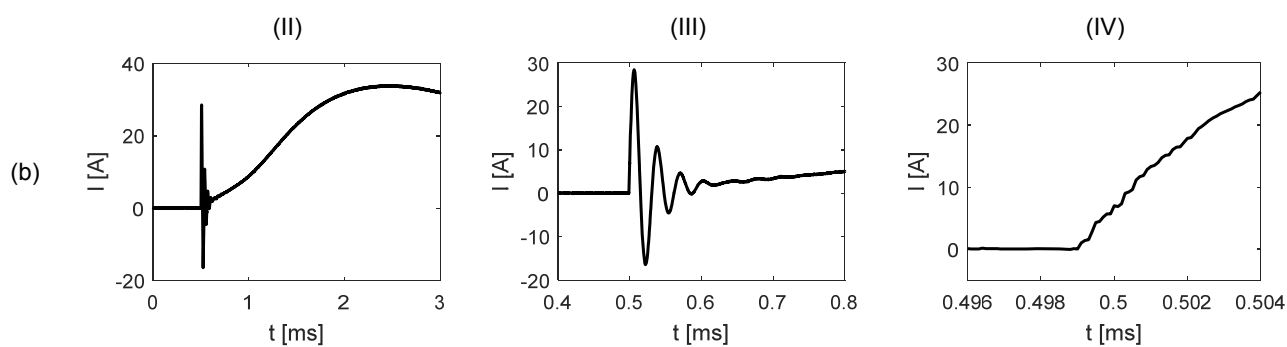
	(II)	(III)
żarówka LED Osram (a)	74,6 kHz	3,14 MHz
	80,1 kHz	3,20 MHz
	75,1 kHz	3,14 MHz
odkurzacz (b)	26,7 kHz	3,07 MHz
	35,2 kHz	3,27 MHz
	30,2 kHz	3,07 MHz
świetlówka (c)	26,5 kHz	3,14 MHz
	19,2 kHz	3,14 MHz
	8,9 kHz	3,14 MHz
żarówka LED Lexman	3,54 kHz	3,14 MHz
	3,44 kHz	3,14 MHz
	3,25 kHz	3,07 MHz
żarówka LED Ikea	56,6 kHz	3,20 MHz
	51,9 kHz	2,31 MHz
	49,7 kHz	4,84 MHz
	49,7 kHz	4,84 MHz

Szacowane dominujące częstotliwości oscylacji dla skali (III) – ułamki ms, dla większości zbadanych urządzeń są odmienne. Jednocześnie, wartości tych częstotliwości powtarzają się dla kolejnych przykładów stanu przejściowego określonego urządzenia. Wspomniane odmienne stany przejściowe dla urządzeń różnych typów (a - żarówki LED, b - odkurzacza, c - świetlówek) można również zaobserwować na przedstawionych rysunkach 4(a), 4(b) i 4(c).

Warto również zwrócić uwagę, że wartości częstotliwości dla skali czasu (IV) – pojedyncze  $\mu$ s, są prawie sobie równe bez względu na typ badanego urządzenia. Pojawienie się składowej o tak wysokiej częstotliwości (ułamki  $\mu$ s to kilka MHz) na początku każdego ze stanów przejściowych, może być związane z parametrami przewodów lokalnej sieci energetycznej. Tego rodzaju hipotezę sformułowano na podstawie odmiennych wyników serii badań stanów przejściowych tych samych urządzeń, które wykonano na tym samym stanowisku laboratoryjnym, ale w odstępie 8 miesięcy. W ciągu tego czasu jedynym czynnikiem, który uległ zmianie był układ zasilania laboratorium jako całości, ponieważ miała wtedy miejsce modyfikacja układu zasilania niskiego napięcia piętra budynku, na którym znajduje się laboratorium. Na poparcie postawionej tezy w niniejszym artykule na Rys. 4(b) oraz Rys. 5 zaprezentowano sygnały prądu podczas włączenia odkurzacza zarejestrowane w odstępie ośmiu miesięcy na tym samym stanowisku laboratoryjnym. Jak widać w zmodyfikowanym układzie zasilania (Rys. 5) nie zaobserwowano składowych o częstotliwości charakterystycznej dla skali (IV).



Rys.4. Stan przejściowy zarejestrowany podczas włączenia: (a) żarówki LED, (b) odkurzacza, (c) świetlóówki dla czterech skal czasu (I)-(IV). Seria pomiarowa nr 1.



Rys.5. Stan przejściowy zarejestrowany podczas włączenia (b) odkurzacza dla trzech skal czasu (II)-(IV). Seria pomiarowa nr 2.

### Podsumowanie

Przedstawione eksperymenty wskazują, że do prawidłowego zarejestrowania stanów przejściowych należy

właściwie dobrać parametry akwizycji. Sygnały zarejestrowane podczas stanów przejściowych zawierają składowe o podobnym paśmie dla różnych urządzeń, jak

również składowe o paśmie unikalnym dla danego typu urządzenia. Wykorzystując odpowiednie metody analizy czasowo-częstotliwościowej (np. przekształcenie Fouriera, przekształcenie falkowe) można opisać sygnały stanów przejściowych za pomocą cech, które wyróżniałyby poszczególne urządzenia. Stany przejściowe mogą zatem, dostarczyć informacji istotnych dla identyfikacji odbiorników energii elektrycznej w systemie nieinwazyjnego monitorowania zużycia energii elektrycznej.

Kolejne eksperymenty będą miały na celu opracowanie metody wyznaczania sygnatury składającej się z cech charakteryzujących urządzenia oraz weryfikację jakości wyznaczonych sygnatur za pomocą algorytmów identyfikacji.

**Autorzy:** mgr inż. Augustyn Wójcik, prof. dr hab. inż. Wiesław Winiński, dr inż. Robert Łukaszewski, Politechnika Warszawska, Instytut Radioelektroniki i Techniki Multimedialnych, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, E-mail: [A.Wojcik@ire.pw.edu.pl](mailto:A.Wojcik@ire.pw.edu.pl), [W.Winiński@ire.pw.edu.pl](mailto:W.Winiński@ire.pw.edu.pl), [R.Lukaszewski@ire.pw.edu.pl](mailto:R.Lukaszewski@ire.pw.edu.pl); dr inż. Ryszard Kowalik, Politechnika Warszawska Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa. E-mail: [ryszard.kowalik@ee.pw.edu.pl](mailto:ryszard.kowalik@ee.pw.edu.pl).

#### LITERATURA

- [1] Tang, G., Wu, K., Lei, J., A Distributed and Scalable Approach to Semi-Intrusive Load Monitoring, *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, 27 (2016), n. 6, 1553–1565.
- [2] Hart, G. W., Nonintrusive Appliance Load Monitoring, *Proc. IEEE*, 80 (1992), n. 12, 1870–1891.
- [3] Reinhardt, A., Burkhardt, D., Zaheer, M., Steinmetz, R., Electric appliance classification based on distributed high resolution current sensing, *IEEE 37th Conf. on Local Comput. Networks Work. (LCN Work. 2012)*, (2012), 999–1005.
- [4] Gupta, S., Reynolds, M. S., Patel, S. N., ElectriSense: single-point sensing using EMI for electrical event detection and classification in the home, *Proc. 12th ACM Int. Conf. Ubiquitous Comput.*, (2010), 139–148.
- [5] Khairuddin, K., Azah, M., Hussain, S., Maytham, S., Event-based S-transform approach for nonintrusive load monitoring, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2016), n. 5, 194–198.
- [6] Xu, Y., Milanović, J. V., Artificial-intelligence-based methodology for load disaggregation at bulk supply point, *IEEE Trans. Power Syst.*, 30 (2015), n. 2, 795–803.
- [7] Wójcik, A., Winiński, W., The method of identification operating states of multi-state electrical devices with complex modes of operation, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2016), n. 11, 87–90.
- [8] Liang, J., Ng, S. K. K., Kendall, G., Cheng, J. W. M., Load signature study part I: Basic concept, structure, and methodology, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 25 (2010), n. 2, 551–560.
- [9] Gillis, J. M., Chung, J. A., Morsi, W. G., Designing New Orthogonal High Order Wavelets for Non-Intrusive Load Monitoring, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 65 (2017), n. 3, 1–1.
- [10] Esa, N. F., Abdullah, M. P., Hassan, M. Y., A review disaggregation method in Non-intrusive Appliance Load Monitoring, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 66 (2016), 163–173.
- [11] Zeifman, M., Roth, K., Nonintrusive appliance load monitoring: Review and outlook, *IEEE Trans. Consum. Electron.*, 57 (2011), n. 1, 76–84.
- [12] Odenberg, R., Measurements of Voltage and Current Surges on the AC Power line in Computer and Industrial Environments, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-104 (1985), n. 10, 2681–2691.
- [13] Bilski, P., Winiński, W., The rule-based method for the non-intrusive electrical appliances identification, *Proc. 2015 IEEE 8th Int. Conf. Intell. Data Acquis. Adv. Comput. Syst. Technol. Appl. IDAACS 2015*, 1 (2015), 220–225.
- [14] Meziane, M. N., et al., Modeling and Estimation of Transient Current Signals, *23rd Eur. Signal Process. Conf.*, (2015), 1960–1964.
- [15] Duarte, C., Delmar, P., Goossen, K. W., Barner, K., Gomez-Luna, E., Non-intrusive load monitoring based on switching voltage transients and wavelet transforms, *FIIW 2012 - 2012 Futur. Instrum. Int. Work. Proc.*, (2012), 101–104.