



## THE POWERLINE HUM SIGNAL AND ENF DATABASE AS TOOLS USED IN THE FORENSIC ANALYSIS OF AUDIO RECORDINGS

Marcin MICHAŁEK

*Institute of Forensic Research, Kraków, Poland*

### Summary

The paper presents a study on the powerline hum signal, which may be registered on digital audio recordings. The described method of verification of the authenticity of questioned recordings is based on analysis of this signal, and is known as the Electric Network Frequency (ENF) criterion. Some aspects of the ENF criterion and a description of methods for acquisition and analysis of the hum signal are presented as well. Powerline hum is treated as unwanted noise by some people, but it can be a valuable source of information. Based on this signal, it is possible to check the integrity of a recording and establish when it was made. The paper presents the properties of the ENF database, which has been built up since 2009 at the Institute of Forensic Research in Kraków. Furthermore, the paper contains the results of tests conducted using various portable and stationary devices, i.e. voice recorders, mobile telephones, laptops, PC stations, a tablet and a video camera, and their ability to register the powerline hum signal. Software developed specially for this study was used for analysis of the hum signal.

### Key words

Digital recording; Powerline hum; ENF database; Authenticity.

*Received 17 June 2014; accepted 16 September 2014.*

### 1. Introduction

At the present time, there are many digital recorders which can be used to record sound. Owing to the fact that sound recordings can be treated as evidence, the analysis of their authenticity has become a matter of importance (Grigoros, 2005; Kajstura, Trawińska, Hebenstreit, 2005; Koenig, 1990; Michałek, 2009). The purpose of this paper is to present powerline hum properties in digital audio recordings and their applicability to the ascertainment of recordings' authenticity. Some tests conducted on various portable and stationary digital devices are presented as well. The definition of the authenticity of recordings is contained in an Audio Engineering Society (AES) document (AES, 1996). According to this definition, the main criteria are the integrity of the examined recording and the fact that it has been recorded simultaneously with the

course of events in question (AES, 1996). The authenticity analysis of analogue recordings is mainly based on the study of characteristic marks, which are made on the tape by electromagnetic heads and are unique for a given tape recorder (Boss, Gfroerer, Neoustroev, 2003). In the case of digital recordings, among others methods, the Electric Network Frequency (ENF) criterion is employed (Cooper, 2008; Grigoros, 2005; Kajstura, Trawińska, Hebenstreit, 2005; Michałek, 2008, 2009). The goal of this method is to study the powerline hum signal, which may be registered during the recording of an event. If this signal is present in the recording and has appropriate parameters, it is possible to extract and analyse it. Then it is possible to compare characteristics of the extracted hum signal against the created referential ENF database, and verify the time and the date of recording (Cooper, 2008; Grigoros, 2005; Grigoros, Cooper, Michałek, 2009;

Kajstura, Trawińska, Hebenstreit 2005 Michalek, 2008, 2009). For some people, e.g., audio engineers, musicians, etc., this kind of signal is usually treated as noise and thus it is very often filtered out or removed from recordings. However, for forensic audio experts, it is a valuable source of information.

## 2. Materials and methods

### 2.1 Materials

#### 2.1.1 Recorders

During the tests, the following brands of digital devices were used:

- portable voice recorders: Creative Zen Nano Plus 1 GB, Marantz PMD671, Olympus (DM, DS, LS, VN and WS series), Panasonic (RR-US series), Philips (GoGear series), Roland Edirol R-09, Sony (MZ and PCM series), Tascam (DR series), TEAC MP-114, Trak DMP575 and ZOOM (H series);
- mobile phones with a voice recording function: LG 9, Nokia (3110c and C2), Samsung GT-C3350, Sony Xperia J, Sony Ericsson W595S;
- laptops and PC stations: Acer, Asus, LG, Sony, Toshiba and Fujitsu Siemens;
- tablet: Pentagram TAB 7.5;
- video camera: JVC GZMG750PE.

All portable voice recorders, mobile phones and the tablet were battery-powered. Laptops and the video camera were battery- or mains-powered, whereas PCs were only mains-powered, with or without a UPS device. In total, over 110 digital devices with a recording function were tested.

#### 2.1.2 Test recordings

The material for further analysis was digital audio recordings made by the above devices. Test recordings were made in different conditions: in urban and rural areas using all the available modes (various quality and audio formats). After being recorded, all test recordings were copied onto the hard disk, converted to 16-bit uncompressed PCM format and downsampled. About 150 hours of test recordings were prepared in this manner.

#### 2.1.3 ENF database

The ENF database at the Institute of Forensic Research in Kraków has been built up since 2009. Apart from scientific research, the ENF database is used in real cases for verification of the authenticity of evidence audio recordings. Referential recordings are made continuously using a dedicated PC station. This PC station is permanently connected to an Uninterruptible Power Supply (UPS) device in case of possible power interruptions. The ENF database is being created with these recordings (Grigoras, Cooper, Michalek, 2009; Michalek, 2009). The ENF database contains the calculated momentary values of current frequency in the electrical network and the time and the date of recordings. Figure 1 shows the method of acquisition of referential recordings and the ENF database.

Referential recordings are made with a sampling frequency at 8000 Hz, 16 bits and in uncompressed PCM WAVE format. They are downsampled to 400 Hz in order to analyse first, second and third order harmonics, at around 50, 100 and 150 Hz respectively. Recording takes place continuously, i.e., 24 hours per day and 7 days per week. Since 2009, around 40,000 hours of referential recordings have been made.

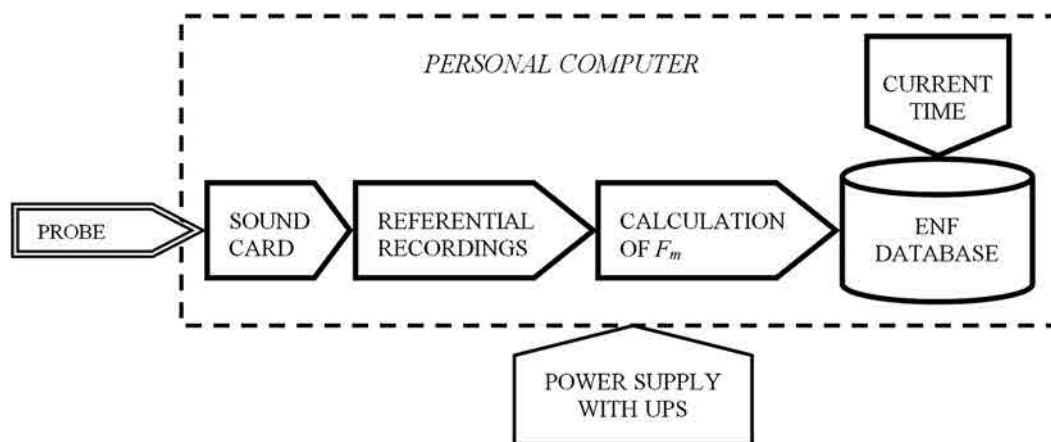


Fig. 1. Acquisition of referential recordings and the ENF database.

## 2.2 Methods

For electrical networks working synchronously, the frequency is a really important parameter (Biernacka, Radzio, 2001; ENTSO-E 2014; Grigoras 2005; Grigoras, Cooper, Michalek, 2009; Kajstura, Trawińska, Hebenstreit, 2005; UCTE, 1998). National power grid operators in Europe are associated in the European Network of Transmission System Operators for Electricity – ENTSO-E (2014). The main two ENF criterion assumptions are as follows: momentary values of current frequency in electrical network are unique for longer periods and the changes of these values are the same in interconnected and synchronized electrical networks (Grigoras, 2005). The preset frequency value is 50 Hz, but it changes randomly in the electrical network. Deviations from the preset frequency are caused by the difference between electricity production and its consumption, and there are no appropriate methods for storing this kind of energy (Biernacka, Radzio, 2001; Cooper, 2008; Grigoras, 2005; Michalek, 2008).

Figure 2 shows the powerline hum signal registered in an audio recording of speech. The momentary value of the current frequency in electrical network is  $F_m = F_p \pm \Delta F$ , where  $F_m$  is the momentary frequency value,  $F_p$  is the preset frequency value, and  $\Delta F$  is the deviation value from  $F_p$ . If demand for electricity is greater than actual production, the  $F_m$  value decreases with time. In the opposite situation, this value increases (Biernacka, Radzio, 2001; Cooper, 2008; Grigoras, 2005; Michalek, 2009). Software created in a MATLAB environment is used to calculate momentary values of current frequency (Michalek, 2008, 2009).

The test recordings from the studied digital recorders were copied onto a hard disk, and converted from various formats to 16 bits and uncompressed PCM waveform. In the case of video files, their soundtracks were extracted. If the hum signal around 50 Hz is strong enough, the recording can be downsampled to 120 Hz (Grigoras, Cooper, Michalek, 2009). For analyzing higher order harmonics, i.e. 100 or 150 Hz, the sampling frequency should be greater, according to the equation  $F_s > 2F_a$ , where  $F_s$  is the sampling and  $F_a$  is the analyzed frequency (Marven, Ewers, 1996). The powerline hum signals coming both from test recordings and from referential recordings are analyzed in the time and frequency domain. In order to calculate  $F_m$  values, the Fast Fourier Transformation (FFT) in sliding window functions was employed with high accuracy in the frequency domain (Marven, Ewers, 1996; Michalek, 2008). On the basis of the created algorithms, dedicated software was constructed in a MATLAB environment and developed for automat-

ic verification of the time and the date of recording, and for detection of discontinuities (Michalek, 2008, 2009).

## 3. Research results

Based on an analysis of the collected referential ENF database, it was estimated that the mean value of computed  $F_m$  values is close to 50 Hz, and the distribution is normal. Figure 3 shows changes in frequencies occurring in the electrical network for referential recordings made during the sample week. It was noted that changes in the current frequency in the electrical network are similar in the same periods of different days. Table 1 contains some statistical parameters for referential recordings, i.e. means of  $F_m$  values, standard deviations and results of the Kolmogorov-Smirnov test.

Table 1  
*Statistical parameters calculated for referential recordings (March 2012)*

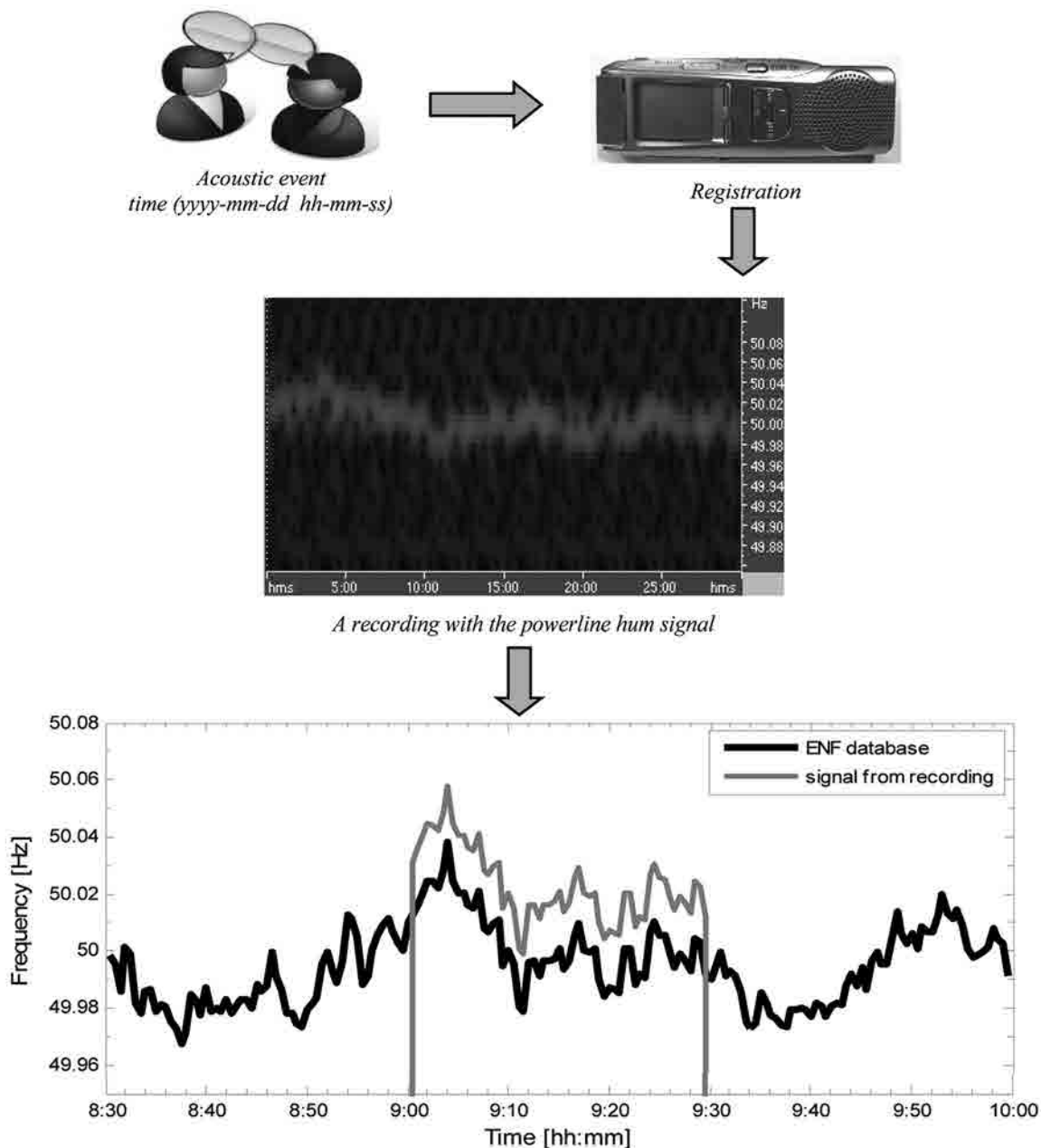
Referential ENF recording	Mean $F_m$ value	Standard deviation	Distribution (Kolmogorov-Smirnov test)
Monday	49.996	0.0224	Normal
Tuesday	49.997	0.0225	Normal
Wednesday	50.000	0.0227	Normal
Thursday	50.000	0.0205	Normal
Friday	50.001	0.0204	Normal
Saturday	49.999	0.0185	Normal
Sunday	50.001	0.0189	Normal

Figure 4 shows  $F_m$  values calculated on the basis of fragments of referential recordings from three different days of the sample week. In the morning, consumption of electricity grows fast and hence the  $F_m$  value falls rapidly. Local operators increase the power in order to avoid a frequency drop below the critical value, which can cause de-synchronization of connected networks. It has been observed that in the afternoon around the end of the working day, the  $F_m$  value grows rapidly. Importantly, it has been established that changes of current frequency for given periods of different days are similar, but they are not the same.

It has been established that battery-only-powered devices: the voice recorders, the laptops, the tablet, the video camera and even the mobile phones are capable of registering the hum signal, both in rural and urban areas (see also: Kajstura, Trawińska, Hebenstreit,

2005; Michalek, 2009). Changes in recording quality do not interfere with the possibility of registering this signal by the tested recorders. Moving the recorder during recording may cause a change in the amplitude of the hum signal. It was established that some of the studied recorders were not capable of registering a hum signal in any tested conditions, e.g., Panasonic RR-US devices and Nokia mobiles. The remaining de-

vices are capable of registering a powerline hum signal on their recordings. It was observed that on some recordings, there was a downshift in hum frequency, even as great as  $-1.12$  Hz. It is also possible to register signals with similar characteristics to the hum signal but with various mean frequencies. This phenomenon was observed especially in the case of portable digital recorders and it is probably caused by the influence of



*Hum signal parameters were extracted, and compared against the ENF database (the best match), allowing verification of the time of the recording and also its integrity.*

Fig. 2. Registration of an acoustic event and general scheme for the authenticity verification of a recording with the powerline hum signal registered.

nearby mains-powered devices. Recording time verification can be performed using the first order harmonic of the hum signal, i.e. around 50 Hz, and with higher order harmonics, around 100 and 150 Hz. Unfortunately, sometimes the higher order harmonics could be masked by speech and other signals. In the case of the tested laptops and video camera, it was observed that the amplitude of the hum signal was significantly higher when using mains rather than battery-power. In the case of stationary computers, it was established that during a simulated power interruption, the referential signal registration was continuous, so it is possible to register the hum signal even during such events. Using UPS does not cause a shift in the powerline hum signal frequency.

The algorithm for automatically searching for and comparing the hum signal frequencies – calculated on the basis of a questioned recording – against the

referential ENF database was implemented using software in a MATLAB environment. The algorithm determines the best-matching time period on the basis of the minimum distance and maximum correlation. The tests showed that deletion of a fragment of a recording or stopping the recording can be observed as a discontinuity of the hum signal (Michalek, 2008, 2009). If the recording has been edited and contains fragments from different recordings, it can be observed that the hum signal has a different amplitude in the spliced fragments. Figure 5 presents a recording which has been manipulated in different ways.

The length and the amplitude of the hum signal are very important factors which affected the accuracy of verification of the recording time and the date. For a strong and continuous hum signal, it was sufficient to have a few-minute-long recording. For recordings with low SNR, i.e. with a lot of interference, the re-

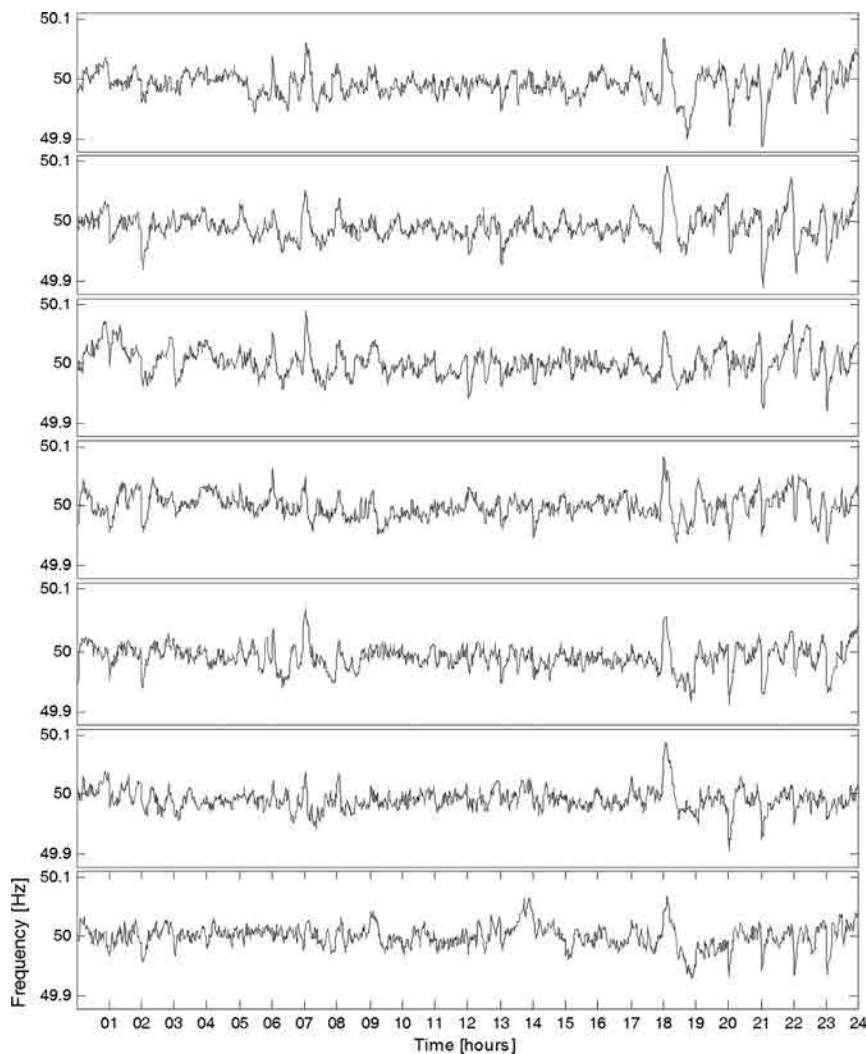


Fig. 3. Changes in frequencies occurring in the electrical network for a sample week, from Monday to Sunday, in March 2012.

corded hum signal should be longer – even fifteen minutes or more. Some interference, mainly impulsive, can be smoothed out by the use of wider time windows for the FFT calculations. Unfortunately, too long time windows may cause the loss of important details of hum characteristics. Figure 6 depicts the influence of various length windows on the FFT analysis of the hum.

#### 4. Conclusions

The tests conducted showed that both battery and mains-powered digital recorders are capable of regis-

tering the hum signal. Based on the ENF criterion, this signal may be used to verify the time and the date of the recording and its continuity. The ENF referential database also provides very useful information about the state of the electrical network. This database is used to verify the authenticity of evidence recordings. Referring to the conducted research, it can be concluded that the powerline hum signal is a source of valuable information about a recording. For audio engineers or musicians, the hum signal is rather an unwanted noise which should be eliminated, but for the audio forensic expert – on the contrary – it is of great importance in evidence analysis.

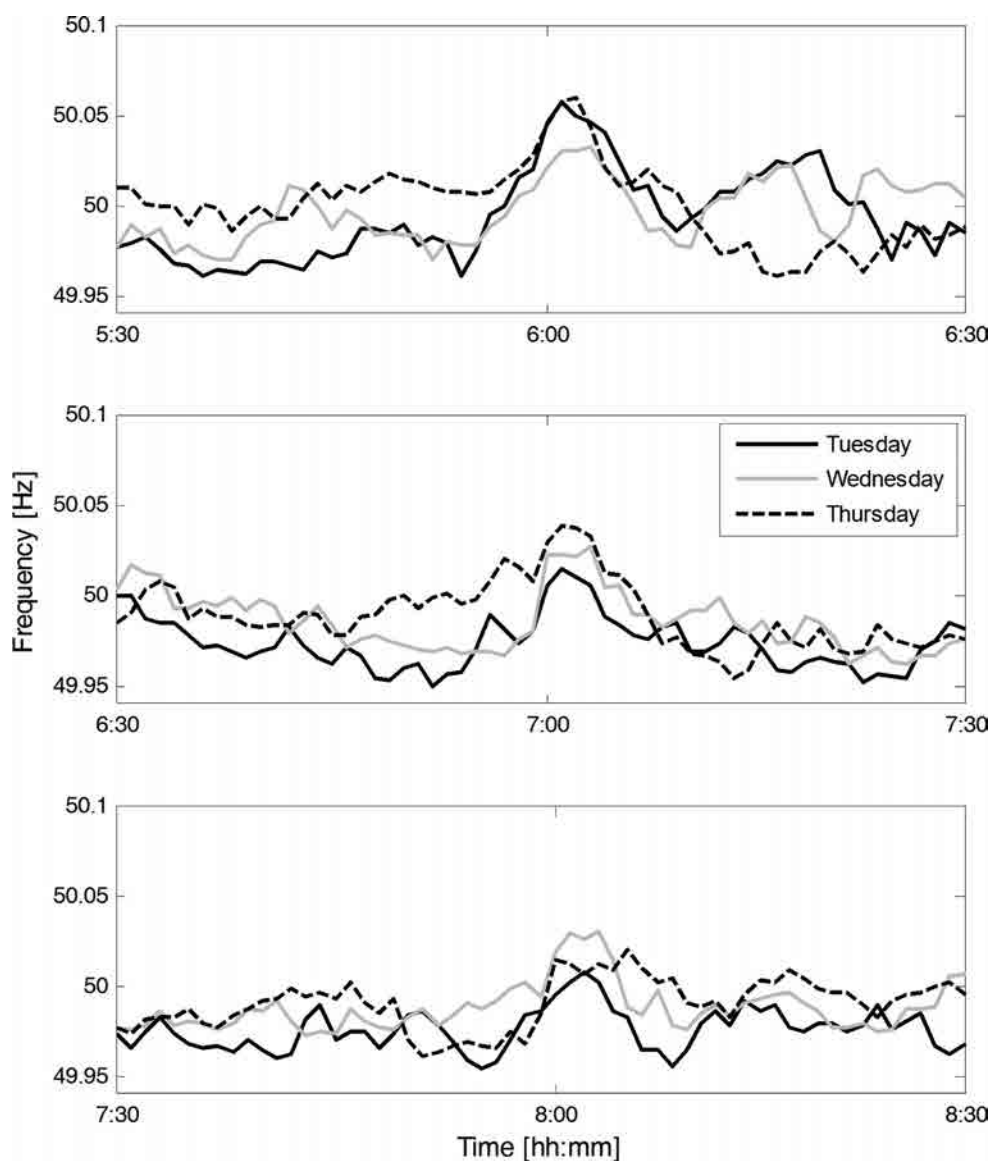


Fig. 4. Changes of the  $F_m$  values established for three different days of the sample week (16–18 April 2013, from 5:30 AM to 8:30 AM).

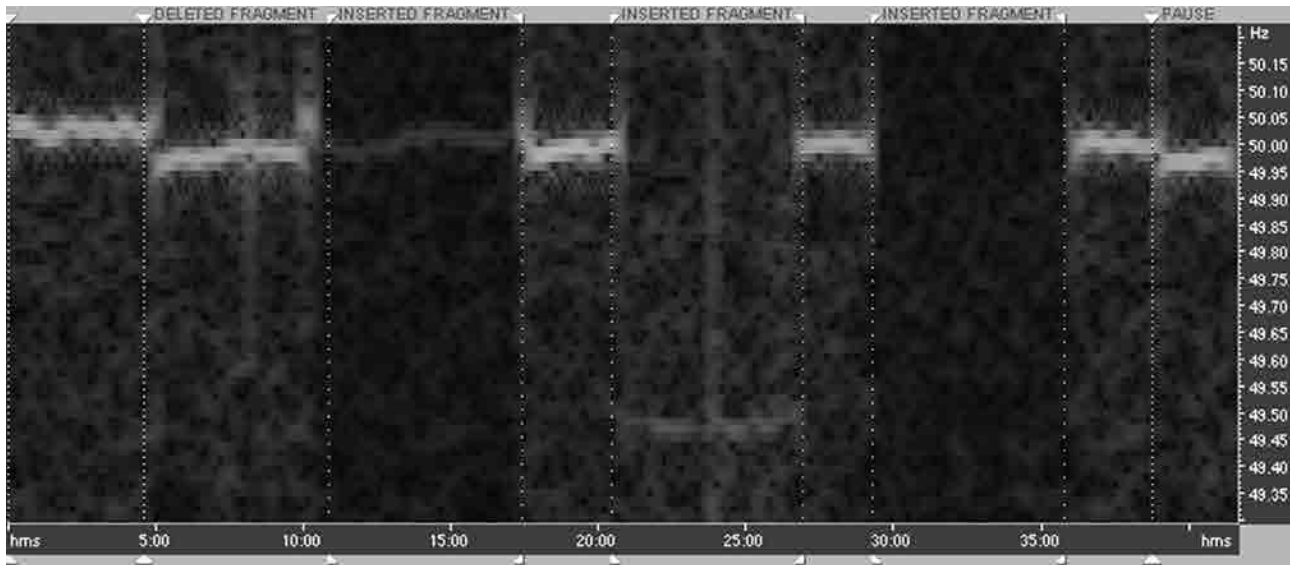


Fig. 5. A spectrogram depicting the hum signal in a recording with discontinuities caused by deletion of a fragment (at around 5 min. of the recording), insertion of fragments from different recordings (about 10, 21 and 29 min) and application of the pause function (around 38 min).

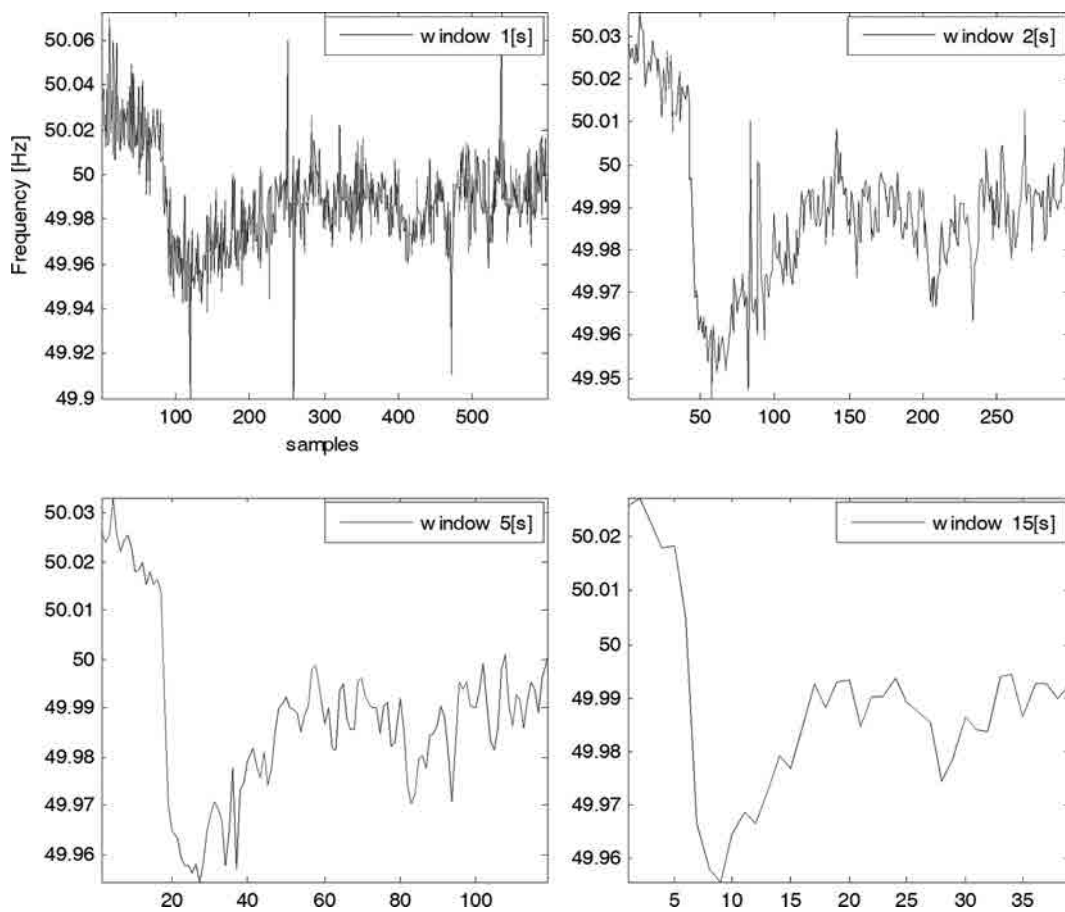


Fig. 6. Influence of time windows of various lengths on FFT analysis of the hum signal.

## References

1. AES. (1996). *Recommended practice for forensic purposes – Managing recorded audio materials intended for examination*. AES27-1996.
2. Biernacka, I., Radzio, I. (2001). *Supervision of the application of rules concerning primary and secondary control of frequency in the interconnected power systems UCTE/CENTREL*. Gdańsk: Power Engineering Conference APE'99.
3. Boss, D., Gfroerer, S., Neoustrouev, N. (2003). A new tool for the visualisation of magnetic features on audiotapes. *The International Journal of Speech Language and the Law, Forensic Linguistics*, 110, 2, 255.
4. Cooper, A. J. (2008). *The Electric Network Frequency (ENF) as an aid to authenticating forensic digital audio recordings – an automated approach*. Denver: AES 33<sup>rd</sup> International Conference.
5. Dean, D. J. (1991). *The relevance of replay transients in the forensic examination of analogue magnetic tape recordings, scientific research and development branch*. London: Home Office, British Government.
6. ENTSO-E. (2014). (Website) <http://www.entsoe.eu/>
7. Grigoras, C. (2005). Digital audio recording analysis: The Electric Network Frequency (ENF) criterion, *International Journal of Speech, Language and the Law*, 12(1), 64–76.
8. Grigoras, C., Cooper, A., Michałek, M. (2009). Forensic Speech and Audio Analysis Working Group – Best practice guidelines for ENF analysis in forensic authentication of digital evidence. ENFSI – FSAAWG.
9. Kajstura, M., Trawińska, A., Hebenstreit, J. (2005). Application of the Electrical Network Frequency (ENF) criterion. A case of a digital recording. *Forensic Science International*, 155, 165–171.
10. Koenig, B. E. (1990). Authentication of forensic audio recordings. *Journal of Audio Engineering Society*, 38(1/2), 3–33.
11. Marven, C., Ewers, G. (1996). *A simple approach to digital signal processing*. Chichester: John Wiley & Sons Inc.
12. Michałek, M. (2008). *The electrical network frequency signal in automatic audio recording analysis*. Bratislava: 10<sup>th</sup> Meeting of the ENFSI Working Group for Forensic Speech and Audio Analysis.
13. Michałek, M. (2009). The application of powerline hum in digital recording authenticity analysis. *Problems of Forensic Sciences*, 80, 355–364.
14. UCTE (1998). Ground rules concerning primary and secondary control frequency and active power within the UCPTE.

---

### Corresponding author

Dr inż. Marcin Michałek  
Institute of Forensic Research  
ul. Westerplatte 9  
PL 31-033 Kraków  
e-mail: mmichalek@ies.krakow.pl

---



# SYGNAŁ PRZYDŹWIĘKU SIECIOWEGO ORAZ BAZA DANYCH ENF JAKO NARZĘDZIA DO ANALIZY NAGRAŃ DŹWIĘKOWYCH DLA CELÓW KRYMINALISTYCZNYCH

## 1. Wstęp

Aktualnie istnieje wiele urządzeń, za pomocą których możliwa jest cyfrowa rejestracja dźwięku. W związku z tym, że nagrania dźwiękowe mogą być uznane za dowód w sprawie, ważnym elementem staje się analiza ich autentyczności (Grigoras, 2005; Kajstura, Trawińska, Hebenstreit, 2005; Koenig, 1990; Michałek, 2009). Celem niniejszej pracy było zaprezentowanie właściwości sygnału przydźwięku sieciowego oraz jego znaczenia w analizie autentyczności nagrań. W ramach prac wykonano liczne nagrania testowe zgromadzonymi urządzeniami zarówno przenośnymi, jak i stacjonarnymi. Definicja autentyczności nagrań zaprezentowana została przez stowarzyszenie inżynierów dźwięku, tj. Audio Engineering Society (AES) i jest zapisana w dokumencie (AES, 1996). W treści tej definicji jako najistotniejsze wskazano zarówno na ciągłość analizowanego nagrania, jak i na jego rejestrację w trakcie trwania zdarzenia akustycznego (AES, 1996). Badania autentyczności analogowych nagrań dźwiękowych opierają się głównie na analizie śladów magnetycznych utrwalanych na taśmie przez głowice, które są charakterystyczne dla konkretnego urządzenia rejestrującego (Boss, Gfroerer, Neoustroev, 2003). W przypadku nagrań cyfrowych, wśród innych metod, stosowane jest kryterium częstotliwości sieci elektroenergetycznej, czyli kryterium ENF (Cooper, 2008; Grigoras, 2005; Kajstura, Trawińska, Hebenstreit 2005; Michałek, 2008, 2009). W metodzie tej analizowany jest sygnał przydźwięku sieciowego, który może zostać utrwalony w nagraniu w trakcie rejestracji zdarzenia. Jeśli taki sygnał znajduje się w obrębie nagrania i posiada odpowiednie parametry, to można go wyekstrahować i poddać dalszym badaniom. Możliwe jest wówczas porównanie właściwości sygnału przydźwięku sieciowego z nagraniem względem referencyjnej bazy danych ENF i na tej podstawie zweryfikować datę i czas rejestracji nagrania (Cooper, 2008; Grigoras, 2005; Grigoras, Cooper, Michałek, 2009; Kajstura, Trawińska, Hebenstreit 2005; Michałek, 2008, 2009). Przydźwięk sieciowy stanowi niekiedy niepożądane zakłócenie, na przykład dla inżynierów dźwięku lub muzyków, przez co może być usuwany z nagrań dźwiękowych w procesie filtracji. Jednakże dla ekspertów zajmujących się analizą nagrań dla celów kryminalistycznych sygnał taki jest źródłem cennych i wykorzystywanych w praktyce informacji.

## 2. Materiały i metody

### 2.1 Materiały

#### 2.1.1 Rejestratory

W trakcie przeprowadzonych testów zgromadzono i wykorzystano urządzenia następujących marek:

- przenośne rejestratory dźwięku (dyktafony): Creative Zen Nano Plus 1 GB, Marantz PMD671, Olympus (serie DM, DS, LS, VN i WS), Panasonic (seria RR-US), Philips (seria GoGear), Roland Edirol R-09, Sony (serie MZ i PCM), Tascam (seria DR), TEAC MP-114, TRAK DMP575 oraz ZOOM (seria H);
- telefony komórkowe z funkcją rejestracji dźwięku: LG 9, Nokia (3110c i C2), Samsung GT-C3350, Sony Xperia J oraz Sony Ericsson W595S;
- laptopy i komputery stacjonarne PC: Acer, Asus, LG, Sony, Toshiba oraz Fujitsu Siemens;
- tablet: Pentagram TAB 7.5;
- kamera wideo: JVC GZMG750PE.

Wszystkie przenośne rejestratory dźwięku, telefony komórkowe oraz tablet posiadały zasilanie bateryjne. Laptopy i kamera wideo zasilane były bateryjnie i sieciowo, natomiast komputery stacjonarne wyłącznie sieciowo z wykorzystaniem urządzenia podtrzymującego zasilanie UPS albo bez niego. Łącznie zgromadzono i poddano testom ponad 110 urządzeń wyposażonych w funkcję cyfrowej rejestracji dźwięku.

#### 2.1.2 Nagrania testowe

Materiałem do dalszych analiz były nagrania testowe utrwalone za pomocą zgromadzonych rejestratorów dźwięku. Nagrania te wykonano w różnych warunkach, tj. na obszarach zurbanizowanych i wiejskich oraz z wykorzystaniem wszystkich możliwych ustawień rejestracji dla danego urządzenia (dostępne jakości i formaty nagrywania). Po zakończeniu rejestracji nagrania testowe skopiowano na dysk twardy komputera, przekonwertowano do nieskompresowanego formatu PCM z kwantyzacją 16 bitów oraz zredukowano częstotliwość próbkowania. W ten sposób przygotowano łącznie około 150 godzin nagrań.

#### 2.1.3 Baza danych ENF

Od 2009 roku w Instytucie Ekspertyz Sądowych w Krakowie budowana jest baza danych ENF. Oprócz

zastosowań naukowych baza ta jest wykorzystywana do badań autentyczności dowodowych nagrań w rzeczywistych sprawach sądowych. Nagrania referencyjne z przydźwiękiem rejestrowane są za pomocą dedykowanego komputera PC. W obwód zasilania tego komputera podłączono na stałe urządzenie zapewniające zasilanie awaryjne w przypadku jego chwilowego zaniku (UPS). Z wykorzystaniem nagrań referencyjnych tworzona jest baza danych ENF (Grigoras, Cooper, Michałek, 2009; Michałek, 2009). Baza ta zawiera obliczone chwilowe wartości odpowiadające częstotliwości prądu w sieci elektroenergetycznej oraz datę i czas rejestracji nagrań referencyjnych. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie sposób akwizycji nagrań referencyjnych i tworzenia bazy danych ENF.

Nagrania referencyjne są rejestrowane z częstotliwością próbkowania 8000 Hz, z kwantyzacją 16 bitów i w nieskompresowanym formacie PCM. Po zarejestrowaniu częstotliwość próbkowania nagrań jest zredukowana do 400 Hz w celu analizy pierwszej, drugiej i trzeciej harmonicznej przydźwięku, tj. oscylującej wokół, odpowiednio, 50, 100 i 150 Hz. Rejestracja nagrań referencyjnych wykonywana jest w trybie ciągłym, tj. 24 godziny na dobę i 7 dni w tygodniu. Od 2009 roku zgromadzono w ten sposób około 40 000 nagrań referencyjnych.

## 2.2 Metody

Częstotliwość prądu to istotny parametr systemów elektroenergetycznych pracujących synchronicznie (Biernacka, Radzio, 2001; ENTSO-E 2014; Grigoras 2005; Grigoras, Cooper, Michałek, 2009; Kajstura, Trawińska, Hebenstreit, 2005; UCTE, 1998). Operatorzy sieci elektroenergetycznych z Europy zrzeszeni są w organizacji European Network of Transmission System Operators for Electricity – ENTSO-E (2014). Dwa główne założenia odnośnie do kryterium ENF są następujące: chwilowe wartości częstotliwości prądu w sieci elektroenergetycznej są niepowtarzalne dla dłuższych okresów, a zmiany tych wartości są takie same w sieciach połączonych i zsynchronizowanych (Grigoras, 2005). Zdana wartość częstotliwości prądu w sieci wynosi 50 Hz, jednakże chwilowe wartości częstotliwości zmieniają się w czasie w sposób losowy. Odchylenia od częstotliwości zadanej wynikają z różnicy wytwarzanej energii elektrycznej i aktualnego zapotrzebowania na nią, gdyż jak dotąd nie ma odpowiednich metod pozwalających na gromadzenie takich ilości energii elektrycznej (Biernacka, Radzio, 2001; Cooper, 2008; Grigoras, 2005; Michałek, 2008).

Na rysunku 2 zaprezentowano przebieg sygnału przydźwięku sieciowego zarejestrowanego w nagraniu dźwiękowym z utrwaloną mową. Chwilowa wartość częstotliwości prądu w sieci elektroenergetycznej wynosi  $F_m = F_p \pm \Delta F$ , gdzie  $F_m$  oznacza wartość chwilo-

wej częstotliwości,  $F_p$  oznacza wartość zadaną, zaś  $\Delta F$  jest odchyłką od  $F_p$ . Jeśli zapotrzebowanie na energię elektryczną jest większe od aktualnej produkcji, wówczas wartość  $F_m$  zmniejsza się w czasie. W przeciwnym przypadku wartość ta zwiększa się (Biernacka, Radzio, 2001; Cooper, 2008; Grigoras, 2005; Michałek, 2009). W ramach niniejszych badań do ekstrakcji sygnału przydźwięku z nagrań i na tej podstawie obliczeń chwilowych wartości częstotliwości zastosowano oprogramowanie stworzone w środowisku obliczeniowym MATLAB (Michałek, 2008, 2009).

Nagrania testowe z badanych urządzeń skopiowano na dysk twardy komputera, a następnie przekonwertowano z różnych formatów zapisu do postaci nieskompresowanej PCM i z kwantyzacją wynoszącą 16 bitów. Z nagrań wideo wyekstrahowano ścieżki dźwiękowe i objęto dalszymi badaniami. Jeśli pierwsza harmoniczna sygnału przydźwięku oscylująca wokół 50 Hz posiada odpowiednio dużą amplitudę, częstotliwość próbkowania nagrania można zredukować do 120 Hz (Grigoras, Cooper, Michałek, 2009). W celu analizy harmonicznych wyższych rzędów tego sygnału, tj. wokół 100 lub 150 Hz, częstotliwość próbkowania musi być większa zgodnie z zależnością  $F_s > 2F_a$ , gdzie  $F_s$  jest częstotliwością próbkowania, zaś  $F_a$  to częstotliwość analizowana (Marven, Ewers, 1996). Sygnał przydźwięku sieciowego zarówno z nagrań testowych, jak i referencyjnych, analizowany jest w dziedzinie czasu i częstotliwości. Obliczanie wartości  $F_m$  odbywa się z wykorzystaniem przesuwanych okien czasowych i szybkiej transformacji Fouriera (FFT) z dużą rozdzielczością w dziedzinie częstotliwości (Marven, Ewers, 1996; Michałek, 2008). Na podstawie opracowanych algorytmów w środowisku obliczeniowym MATLAB zaimplementowano oprogramowanie służące do automatycznej weryfikacji daty i czasu rejestracji nagrania oraz detekcji nieciągłości (Michałek, 2008, 2009).

## 3. Wyniki badań

Analiza danych zgromadzonych w bazie danych ENF pozwoliła ustalić, że wartość średnia obliczonych wartości  $F_m$  jest bliska 50 Hz, zaś rozkład tych wartości jest normalny. Rysunek 3 prezentuje zmiany częstotliwości prądu w sieci elektroenergetycznej obliczone na podstawie nagrań referencyjnych zarejestrowanych w okresie jednego, przykładowego tygodnia. Zauważono, że zmiany częstotliwości prądu w sieci elektroenergetycznej wykazują podobieństwo w tych samych okresach różnych dni tygodnia. W tabeli 1 zamieszczono parametry statystyczne wyznaczone na podstawie analizy nagrań referencyjnych, tzn. średnie wartości  $F_m$ , odchylenia standardowe oraz rezultaty testu statystycznego Kołmogorowa-Smirnowa.

Na rysunku 4 zaprezentowano wartości częstotliwości  $F_m$  obliczone dla fragmentów nagrań referencyjnych zarejestrowanych w trzech różnych dniach przykładowego tygodnia. W godzinach porannych zapotrzebowanie na energię elektryczną gwałtownie wzrasta, co skutkuje tym, że wartości  $F_m$  również gwałtownie maleją. Lokalni operatorzy sieci elektroenergetycznych poprzez zwiększenie produkcji energii przed przewidywanym wzrostem jej konsumpcji zapobiegają spadkom wartości częstotliwości prądu poniżej wartości krytycznej, co mogłoby spowodować desynchronizację połączonych sieci. Zaobserwowano, że w godzinach popołudniowych, w okresach związanych z końcem dnia pracy, wartości  $F_m$  gwałtownie wzrastają. Ustalono, co bardzo istotne, że choć zmiany częstotliwości dla tych samych okresów różnych dni wykazują podobieństwo, to jednak nie są identyczne.

Analiza nagrań testowych wykazała, że urządzenia zasilane wyłącznie bateryjnie, takie jak dyktafony, laptopy, tablety, kamera wideo, a nawet niektóre telefony komórkowe, mogą rejestrować sygnał przydźwięku zarówno na obszarach wiejskich, jak i zurbanizowanych (zobacz też: Kajstura, Trawińska, Hebenstreit, 2005; Michalek, 2009). W trakcie badań stwierdzono, że wybór jakości nagrywania nie miał znaczenia dla możliwości rejestracji tego sygnału przez dane urządzenie. Przemieszczanie rejestratora podczas nagrywania może powodować zmianę amplitudy sygnału przydźwięku w nagraniu. Ustalono, że niektóre spośród testowanych urządzeń nie rejestrują tego sygnału w żadnych warunkach, na przykład dyktafony Panasonic RR-US oraz telefony komórkowe Nokia. Pozostałe badane urządzenia rejestrują przydźwięk sieciowy w obrębie swoich nagrań. Zaobserwowano także, że niekiedy sygnał ten charakteryzuje się przesunięciem względem osi częstotliwości dochodzącym nawet do wartości  $-1,12$  Hz. Możliwa jest również rejestracja sygnałów o charakterystykach zbliżonych do przydźwięku, lecz o różnych średnich wartościach częstotliwości. Efekt ten zaobserwowano głównie w przypadku przenośnych rejestratorów dźwięku i jest on spowodowany prawdopodobnie oddziaływaniem na rejestrator przez inne, blisko umiejscowione urządzenia zasilane sieciowo. Weryfikacja czasu rejestracji nagrania może zostać wykonana z wykorzystaniem pierwszej harmonicznej sygnału przydźwięku, tj. w pobliżu 50 Hz, jak również harmonicznych wyższych rzędów wokół 100 i 150 Hz. Niekiedy jednak wyższe harmoniczne mogą zostać zakłócone przez sygnał mowy i inne sygnały w pobliżu tych harmonicznych. Zaobserwowano, że amplituda przydźwięku w nagraniach zarejestrowanych za pomocą laptopów i kamery wideo była znacząco większa, gdy urządzenia te były zasilane sieciowo niż przy wykorzystaniu baterii. Symulacja chwilowej awarii zasilania nie spowodowała przerwy w rejestracji przydźwięku za pomocą komputerów stacjonarnych, co wskazuje, że nawet

w takich przypadkach możliwa jest ciągła rejestracja tego sygnału. Ustalono, że zastosowanie w torze zasilania urządzenia UPS nie powoduje efektu przesunięcia częstotliwości sygnału przydźwięku.

Algorytm do automatycznego przeszukiwania i porównywania chwilowych częstotliwości przydźwięku sieciowego obliczonych na podstawie analizowanego nagrania względem referencyjnej bazy danych ENF zaimplementowano w postaci oprogramowania w środowisku MATLAB. Algorytm ten wyznacza najlepsze dopasowanie przebiegów przydźwięku na podstawie minimalnej odległości i maksymalnej korelacji. Przeprowadzone testy wykazały, że usunięcie fragmentu nagrania lub zatrzymanie jego rejestracji powoduje powstanie nieciągłości sygnału przydźwięku (Michalek, 2008, 2009). Jeśli nagranie było edytowane i zawiera fragmenty z różnych nagrań, wówczas zaobserwować można, że sygnał przydźwięku charakteryzuje się różną amplitudą w obrębie łączonych fragmentów. Na rysunku 5 przedstawiono efekty zastosowania różnego rodzaju edycji w odniesieniu do nagrania dźwiękowego.

Istotnymi elementami wpływającymi na dokładność ustalenia daty i czasu rejestracji nagrania są długość i amplituda sygnału przydźwięku. Jeśli sygnał ten w nagraniu charakteryzuje się odpowiednio dużą amplitudą i ciągłością, wówczas dla odpowiedniej weryfikacji wystarczające jest, aby nagranie trwało kilka minut. Jeżeli stosunek SNR tego sygnału jest niewielki, na przykład dla nagrań z licznymi zakłóceniami, wówczas utrwalony przydźwięk powinien charakteryzować się dłuższym czasem trwania. Ustalono, że w takich przypadkach nagranie z przydźwiękiem powinno trwać nawet piętnaście minut lub więcej. Dłuższe okna czasowe dla obliczeń FFT pozwalają na redukcję niektórych zakłóceń, zwłaszcza impulsowych oraz na wygładzenie przebiegu częstotliwościowego, jednakże zastosowanie zbyt długich okien może spowodować utratę istotnych szczegółów w charakterystyce przydźwięku. Na rysunku 6 przedstawiono wpływ zastosowania okien czasowych o różnej długości na wynik analizy FFT przydźwięku.

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone testy wykazały, że urządzenia do cyfrowej rejestracji dźwięku zasilane zarówno bateryjnie, jak i sieciowo, umożliwiają utrwalanie sygnału przydźwięku sieciowego w obrębie swoich nagrań. Na podstawie kryterium ENF możliwe jest wykorzystanie tego sygnału do weryfikacji daty i czasu rejestracji nagrania oraz analizy jego ciągłości. Skonstruowana referencyjna baza danych ENF dostarcza wiele użytecznych informacji odnośnie do właściwości sieci elektroenergetycznej. Zgromadzone w niej dane wykorzystywane są do badań autentyczności dowodowych nagrań. Podsumowując prze-

prorowadzone badania, można wysnuć wniosek, że sygnał przydźwięku sieciowego jest źródłem cennych informacji o zarejestrowanym nagraniu. Dla inżynierów dźwięku lub muzyków stanowi on niepożądane zakłócenie, które należy eliminować, natomiast dla ekspertów z zakresu fonoskopii sygnał przydźwięku ma ogromne znaczenie w analizie nagrań do celów kryminalistycznych.