



# THE APPLICATION OF POWERLINE HUM IN DIGITAL RECORDING AUTHENTICITY ANALYSIS

Marcin MICHAŁEK

*Institute of Forensic Research, Kraków, Poland*

## Abstract

The following paper discusses a method of analyzing the authenticity of digital recordings on the basis of the registered powerline hum. Theoretical aspects of the problem and a description of algorithms for automatic extraction and hum analysis are included. The practical application of the proposed algorithms used in software for working with digital recordings registered by devices of various brands is presented. Furthermore, the paper contains results of tests conducted regarding both automatic verification of the time and date of recording and detection of discontinuity of digital recordings of various quality.

## Key words

Authenticity; Digital recording; Powerline hum; ENF Criterion.

*Received 16 June 2009; accepted 9 September 2009*

## 1. Introduction

With the introduction of digital sound recordings as evidence, the study of their authenticity has become a matter of importance. Among other things, the Electric Network Frequency (ENF) Criterion is employed [5]. It consists in analysing the powerline hum signal which can be registered during the recording of an event [4, 5, 7]. The main recording authenticity assumptions included in the definition by the Audio Engineering Society (AES) are based on the integrity of the recording and its having been recorded simultaneously with the course of events in question [1]. If, in the course of making the recording, a hum signal of relevant parameters has been registered, its extraction, analysis and comparison with a collected reference database becomes possible, in order to enable verification of time and date of registering. It is possible to detect inconsistencies in the continuity of the recording [5, 7]. The ENF Criterion method is based on the fact that momentary values of current frequency in intercon-

nected electrical networks are the same, and that these changes are unique for longer time periods [5, 7].

The purpose of this paper was to analyze the properties of powerline hum in digital recordings made by various devices, design algorithms for its optimal detection, extraction, parameter calculation and automatic searching and comparison with accessible reference databases and their continuity analysis. These algorithms were implemented as software, after which the method was validated.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Materials used for analysis

During the study, the following digital sound recorders were used: Sony MZ-NH900 Portable Mini-Disc Recorder, Sony ICD-MS515 Portable Digital Recorder, Sony ICD-B7 IC Recorder, Olympus DS-50, Olympus DS-30, Panasonic RR-US395, TRAK DMP575,

TEAC MP-114 and Nokia 6610 mobile phone with a voice recording function. In the course of making test recordings, all available modes of sound registration with varied quality and compression were employed. All recorders were battery-powered. Also a network electricity-powered portable computer LG XNOTE LS50a with external microphone was used in the tests. After each test recording was made, it was copied onto the computer's hard disc and converted to PCM \*.wav format for further analysis. Almost 59 hours of test recordings were prepared.

In order to create an ENF reference database, a desktop computer with a professional RME sound card and attached probe adjusted to register hum signal was used. Almost 473 hours of mono with 200 Hz sampling and 16-bit depth recordings in PCM \*.wav format were prepared in this manner [6] using Adobe Audition. With this material, a reference database containing the calculated momentary values of current frequency in the electrical network and the time and date of recording was created. Figure 1 presents the method of making test recordings and creating the ENF reference database. Additionally, model data from the Polish Electroenergetic Networks were used, in files containing the deviation value from the preset frequency for each second, which altogether correspond to 192 hours of recording.

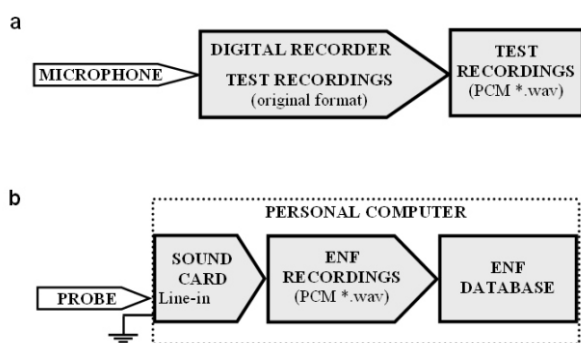


Fig. 1. Method of making test recordings (a) and creating the ENF reference database (b).

## 2.2. Methods of electrical network frequency analysis

Frequency is the most important parameter for synchronous electrical systems such as UCTE/CENTREL [3, 9]. The preset frequency value, with the exclusion of correction periods is 50 Hz. If the temporary deviation from this frequency is less than  $\pm 0.050$  Hz, then the system working conditions are deemed as normal. If it varies between 0.050 and 0.150 Hz, the system working conditions are deemed as cluttered, but possi-

ble to be corrected [3]. It can be generally asserted that the momentary value of current frequency in the electrical network is:

$$F_t = F_0 + F \quad [Hz], \quad \{1\}$$

where:  $F_t$  – momentary value of current frequency in electrical network;  $F_0$  – preset frequency value;  $F$  – deviation value from preset frequency.

Deviations from preset frequency are caused by the difference between demand for electricity and current supply. Due to this, measures are taken in order to control the functioning of the electrical system, including momentary frequency value monitoring [3, 9]. Figure 2 shows the changes in current frequencies in the electrical network, calculated on the basis of recordings made during a 24-hour period simultaneously in two different locations in Lesser Poland, 50 kilometres apart.

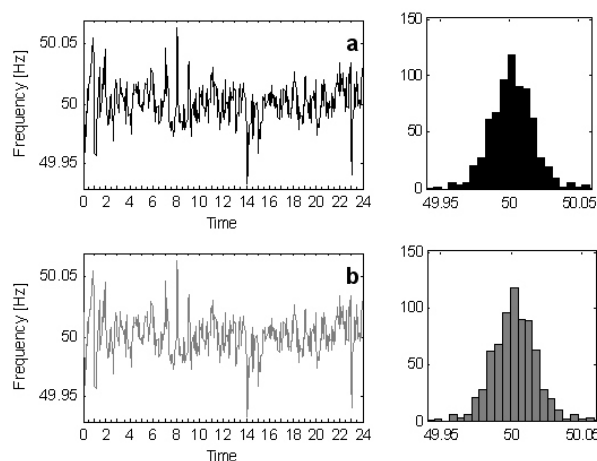


Fig. 2. Changes in frequencies occurring in the electrical network during a 24-hour period with histograms of momentary values for two different locations.

As can be seen, the changes in frequencies for two different locations are identical. The mean value of frequency for the period was 50.002 Hz with a standard deviation of 0.016 Hz. Based on analysis of the collected ENF reference database it was estimated that the distribution of momentary current frequency values in the electrical network is close to a normal distribution. Figure 3 presents the changes in frequencies recorded for the same period, i.e. from 05:00 AM to 08:00 AM on the same day of the week for three consecutive weeks.

The three graphs in Figure 3 are significantly different, which confirms the existence of random changes in current frequency.

Amplitude accuracy for all test recordings was unified at 16 bit and the frequency sampling lowered in

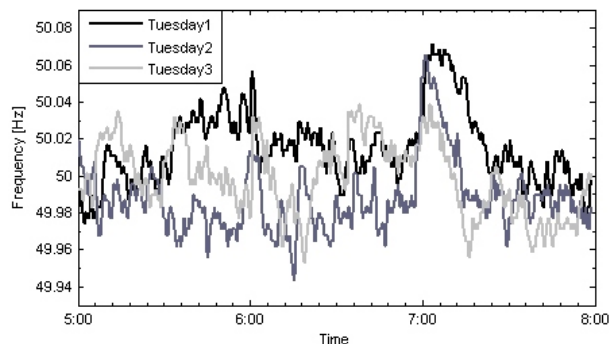


Fig. 3. Changes in frequencies in the electrical network established for three successive Tuesdays from 5:00 to 8:00 am.

each of them to 600, 400 and 200 Hz for the purpose of the analysis of the third (150 Hz), second (100 Hz) and first (50 Hz) harmonic of the analysed hum signal, respectively. The recordings were also band-pass filtered by means of the Butterworth filter on the narrow band nearing the analysed harmonic value. On the basis of the developed algorithms for automatic verification of the time and date of the recording, and for detection of discontinuities, software was created by means of MATLAB environment. In order to calculate the momentary frequency value  $F_{t\_rec(i)}$  of the hum signal in the recording, fast Fourier transformation in sliding window functions was employed [8], and an accuracy within 0.001 Hz in the frequency domain was achieved. The optimal temporal accuracy was calculated by means of  $F_{t\_rec(i)}$  in variable-length window functions, usually from 1 to 10 s. Additionally, when the analysed signal was characterised by a very small SNR (signal-to-noise ratio), calculations of  $F_{t\_rec(i)}$  were performed on the level of a selectable narrow band – usually from  $\pm 0.05$  to  $\pm 0.2$  Hz around the given harmonic. Within the time function, moving along the signal from the beginning to the end, the consecutive frequency value was calculated and saved into a data vector.

The algorithm for automatic searching and comparison of the calculated hum signal frequencies from the test recordings against the referential ENF database was based on two independent methods. The first one determines the correlation between the vector which contains the frequencies of the registered hum signal and the consecutive fragments (vectors) of the ENF database. These vectors move step-by-step against each other, according to the equation:

$$R_{xy}(m) = E \{x(n)y(n - m)\} \quad \{2\}$$

where  $x$  and  $y$  are the analysed data vectors,  $m$  and  $n$  – indexes, and  $E$  is the expected value [6, 11]. The second method determines the distance between the two

data vectors, making use of their norms, which can be rendered as:

$$D_{xy} = \frac{\|x - y\|}{\|x\|} \quad \{3\}$$

[10, 11].

Based on information on the time of registration collected in the database, its algorithm determines the best-matching time period according to the maximum correlation coefficient and minimum distance. Discontinuities in recording may arise from stopping the recording process (pause) or removal or addition of a recording segment by means of sound editing software. The algorithm for detection of possible discontinuity is based on changes in the power of the hum signal and its frequency within a given time range, detecting statistically different values. This can be rendered as:

$$X_{pwr}(n_1, n_2) = \frac{1}{(n_2 - n_1)} \int_{n_1}^{n_2} x^2(n) \, dn \quad \{4\}$$

where  $X_{pwr}$  is the power of the signal  $x$  calculated within the range of  $n_1$  to  $n_2$  [10]. A block graph of algorithms is presented in Figure 4. The use of other algorithms for extraction and analysis of the hum signal in digital recordings can also be found in [2] and [4].

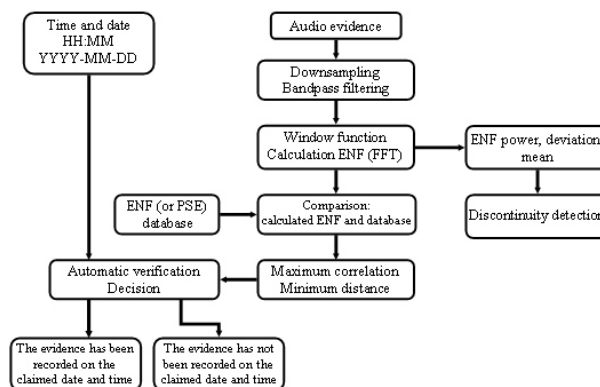


Fig. 4. Block graph of algorithms for automatic verification of recording time and date and detection of discontinuity.

### 3. Results

It was established on the basis of the test recordings, collected reference databases and their analysis with the use of the developed algorithms that:

- battery-only-powered devices are capable of registering hum signal, both in areas that are poorly and well covered by the electrical network (see also [7]);
- Sony ICD-B7 and Panasonic RR-US395 digital recorders and the Nokia 6610 mobile phone do not

- register hum signal at all, while the remaining devices do register it;
- analysis of recordings from the Olympus DS-50, Olympus DS-30, Sony ICD-MS515, TEAC MP-114 and LG XNOTE LS50a recorders showed a shift in hum frequency on the frequency axis – in some cases even as great as  $-0.07$  Hz, independent of signal compression level, which probably results from the quality of the used electronic components; such a signal, however, still permits recording authenticity testing;
  - moving the recorder even just a few meters during recording may cause a change in the amplitude of registered hum signal;
  - the main factor affecting the accuracy of the recording time and date verification is the length of the registered hum in the recording, the level of interference and the length of the window function used for the *FFT* calculations (see Table I);
  - automatic discontinuity detection is influenced by the level of interference – optimal results were achieved at *SNR*  $-20$  dB;
  - recording time verification can be performed at the first hum signal harmonic and the higher harmonics of the hum signal (e.g. 100 Hz for the Sony MZ-NH900, TRAK DMP575, or TEAC MP-114);
  - the distribution of momentary current frequency values in the electrical network is close to a normal distribution;
  - changes in recording quality did not interfere with the possibility of registering the hum signal by a given device;
  - it is possible to register other signals with average frequencies below or above the hum signal, and with similar characteristics, probably due to the influence of nearby network-powered devices.

Criteria were established on the basis of the conducted analyses that had to be met by the hum signal in order for it to be correctly extracted from the recording and reliably verified against the reference database. Table 1 shows the influence of interference on the minimum time required for the registration of a hum signal which allows correct verification against the reference database, best-match correlation coefficients and mean quadratic errors (*MQE*) for provided *SNR* values and window functions. For recordings with a lot of interference, i.e. with low *SNR* value, it is required that the hum signal registered in them be characterised by a longer time of recording. In order to eliminate impulse interference and smoothen the characteristic, wider windows may be employed. However, overly wide windows may cause a loss of important details, and in consequence increase the probability of erroneous verification.

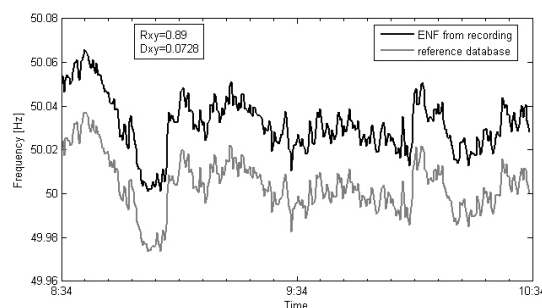


Fig. 5. Graphic representation of the result of time of recording against reference database.  $R_{xy}$  denotes the correlation coefficient, whereas  $D_{xy}$  – the distance between two best-matching vectors. For better representation, the ENF signal from the recording was shifted 0.025 Hz on the frequency axis.

TABLE I. INFLUENCE OF INTERFERENCE ON HUM SIGNAL ANALYSIS PARAMETERS AND CORRECT VERIFICATION AGAINST REFERENCE DATABASE

<i>SNR</i> [dB]	Length of window function [s]	Minimal length of ENF signal in recording [min]	Correlation coefficient	<i>MQE</i>
20	2	2	0.92–0.99	0.0012–0.0015
10	2	2	0.88–0.99	0.0016–0.0019
0	2	2	0.71–0.93	0.0045–0.0048
-5	2	3	0.52–0.85	0.0069–0.0083
-10	2	10	0.49–0.62	0.015–0.016
-15	5	15	0.68–0.89	0.069–0.078
-20	5	15	0.41–0.63	0.014–0.016
-25	20	15	0.71–0.86	0.0046–0.0065

Figure 5 depicts a sample visualisation of recording time verification results based on hum signal extracted from the recording and calculated frequencies.

The tests have shown that apart from the obvious partial loss of hum signal resulting from removal of a fragment of the recording or stoppage of registration, the so-called spectral leak effect [8] also occurs, shown in Figure 6. It is visible as a “blur” of the signal concentrated near 50 Hz overlapping onto neighbouring frequencies, disappearing in a very narrow band where the discontinuity occurs. This phenomenon was observed in cases of manipulation, through e.g. pasting of several fragments of recordings together. These observations can allow detection of discontinuities in the recording. If the recordings were made in different

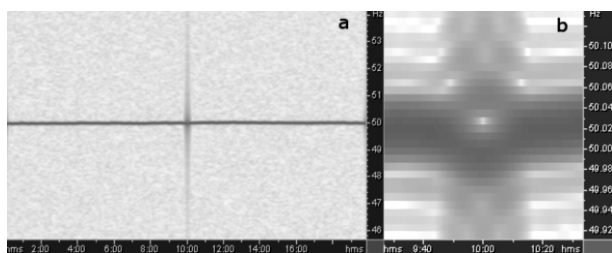


Fig. 6. A spectrogram depicting hum signal in a recording with a discontinuity in the recording detected at around the 10<sup>th</sup> minute (a) and disappearance of this signal in the narrow band nearing 50.025 Hz (b).

conditions or with different recorders, then is it very likely that the combined fragments will differ significantly in terms of the power of the hum level.

The tests revealed that the optimal detection of discontinuity by means of the developed algorithm is possible for *SNR* of no less than  $-20$  dB. Below this value the number of falsely detected discontinuities grows rapidly, due to the intensity of interference (mainly impulse interference). Figure 7 shows the visualisation of a recording continuity test, where a few-seconds-long fragment was removed, based on the registered hum signal.

Apart from graphic representation, the software developed on the basis of the algorithms described above provides numerical results from the comparative analysis and continuity test, including: frequency sampling, quantisation and audio file length, mean frequency values and standard deviations for ENF, maximum correlation coefficient and minimum distance, time of start and end with the best match in the database, mean quadratic error and mean absolute error between analysed data and reference data, and the locations of possible discontinuities in the recording.

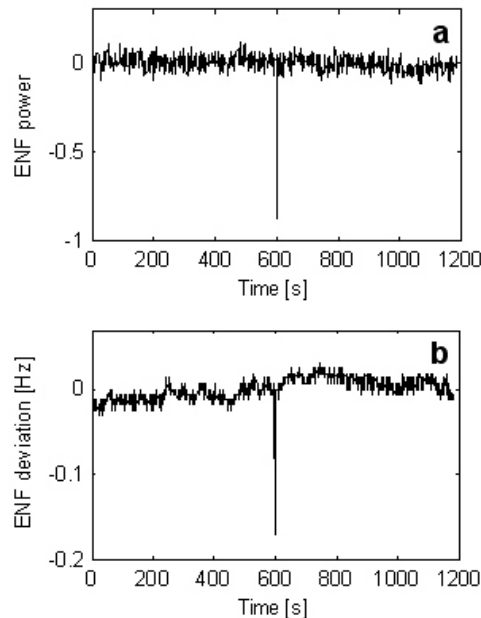


Fig. 7. Visualisation of the continuity test result based on hum signal parameter analysis, i.e. power changes (a) and momentary frequency deviation from mean value (b). Correct discontinuity detection occurred at the 601<sup>st</sup> second of the recording.

Validation of the developed algorithms was performed according to the EN ISO/IEC 17025 norm. For this purpose, the collected recordings and model data from the Polish Electroenergetic Networks were used. During the validation the following were tested: repeatability, reproducibility, the measurement range and detectability through establishment of minimum requirements for registered hum signal, precision and uncertainty of measurements on the basis of the level of matching and errors.

#### 4. Conclusions

The conducted tests showed that digital recorders, both battery- and network-powered, are capable of registering hum signal and its harmonics. These signals may be used to verify the time and date of the recording and its continuity analysis, some criteria which have been described in this paper, however, must be met. Some types of recorders are not capable of registering the powerline hum signal at all, whereas some cause a shift in its characteristics in relation to its actual frequencies. Taking into account the Electric Network Frequency Criterion and the observed characteristics of test recordings, algorithms and software were developed which allowed full automation of activities connected with hum signal detection, reference

database searching, time and date of registration verification, and analysis of its continuity. This replaces the hitherto widespread time-consuming method of comparing hum characteristics viewed on a spectrogram with individual database fragments. The software can work with a reference database collected on a personal computer with a sound card. It also allows employment of model and official data recorded by power grid operators, which contributes to greater reliability of results obtained for the needs of the administration of justice.

## References

1. AES, Recommended practice for forensic purposes – Managing recorded audio materials intended for examination, AES27-1996.
2. Andersson F., Determining recording time of digital sound-recordings using the ENF criterion, Department of Electrical Engineering, Linköpings Universitet, Linköping 2009.
3. Biernacka I., Radzio I., Supervision of the application of rules concerning primary and secondary control of frequency in the interconnected power systems UCTE/CENTREL, Present-day Problems of Power Engineering Conference APE'99, Gdańsk 2001.
4. Cooper A. J., The electric network frequency (ENF) as an aid to authenticating forensic digital audio recordings – an automated approach, AES 33<sup>rd</sup> International Conference, Denver 2008.
5. Grigoras C., Digital audio recording analysis: The electric network frequency (ENF) criterion, *International Journal of Speech, Language and the Law* 2005, 12, 64–76.
6. Grigoras C., Cooper A., Michałek M., Forensic Speech and Audio Analysis Working Group – best practice guidelines for ENF analysis in forensic authentication of digital evidence, ENFSI – FSAAWG, 2009.
7. Kajstura M., Trawińska A., Hebenstreit J., Application of the electrical network frequency (ENF) criterion. A case of a digital recording, *Forensic Science International* 2005, 155, 165–171.
8. Lyons R. G., Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000.
9. UCTE, Ground rules concerning primary and secondary control frequency and active power within the UCPTE, 1998.
10. Zalewski A., Cegiela R., MATLAB – obliczenia numeryczne i ich zastosowania, Wydawnictwo NAKOM, Poznań 1996.
11. Zieliński T. P., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2007.

---

### Corresponding author

Marcin Michałek  
Instytut Ekspertyz Sądowych  
ul. Westerplatte 9  
PL 31-033 Kraków  
e-mail: mmichalek@ies.krakow.pl

---

# ZASTOSOWANIE PRZYDŹWIĘKU SIECIOWEGO W BADANIACH AUTENTYCZNOŚCI NAGRAŃ CYFROWYCH

## 1. Wstęp

Wykorzystanie nagrań w postaci cyfrowej jako dowodów powoduje, że istotną kwestią staje się badanie ich autentyczności. W tym celu wykorzystywane jest m.in. kryterium ENF (ang. electric network frequency criterion, ENF) [5]. Polega ono na analizie zawartego w nagraniu sygnału przydźwięku sieciowego, który może zostać utracony w trakcie rejestracji zdarzenia [4, 5, 7]. Główne założenia autentyczności nagrania zawarte w definicji Stowarzyszenia Inżynierów-Akustyków (Audio Engineering Society, AES), bazują na integralności nagrania oraz jego rejestracji równocześnie z trwaniem przedmiotowego zdarzenia [1]. Jeśli w nagraniu cyfrowym utracono sygnał przydźwięku o odpowiednich parametrach, możliwa staje się jego ekstrakcja, analiza i porównanie ze zgromadzoną bazą referencyjną w celu weryfikacji daty i czasu rejestracji nagrania. Na tej podstawie możliwe jest również ustalenie ewentualnych braków ciągłości zapisu [5, 7]. Podstawą metody kryterium ENF jest to, że chwilowe wartości częstotliwości prądu w połączonych sieciach elektroenergetycznych są takie same oraz to, że zmiany te są niepowtarzalne dla dłuższych przedziałów czasu [5, 7].

Celem niniejszej pracy było zbadanie właściwości przydźwięku sieciowego w nagraniach cyfrowych zarejestrowanych za pomocą zgromadzonych urządzeń, zaprojektowanie algorytmów do optymalnej jego detekcji, ekstrakcji, obliczania parametrów oraz automatycznego przeszukiwania i porównywania z dostępnymi bazami referencyjnymi wraz z analizą ciągłości zapisu. Zaimplementowano również wymienione algorytmy w postaci oprogramowania oraz dokonano walidacji metody.

## 2. Materiał i metody

### 2.1. Materiał do badań

W celu realizacji badań wykorzystano następujące urządzenia cyfrowe umożliwiające rejestrację dźwięku: rejestratory cyfrowe Sony MZ-NH900 Portable Mini-Disc Recorder, Sony ICD-MS515 Portable Digital Recorder, Sony ICD-B7 IC Recorder, Olympus DS-50, Olympus DS-30, Panasonic RR-US395, TRAK DMP575, TEAC MP-114 i telefon komórkowy Nokia 6610 z funkcją dyktafonu. Podczas rejestracji nagrań testowych wykorzystano dostępne tryby nagrywania, uwzględniając jakość i kompresję. Wszystkie rejestratory w trakcie badań zasilane były za pomocą baterii. Do testów wykorzy-

stano również komputer przenośny LG XNOTE LS50a wraz z zewnętrznym mikrofonem, zasilany z sieci elektroenergetycznej. Każde z nagrań testowych, po zarejestrowaniu, skopiowano na dysk twardy komputera i przekonwertowano do postaci PCM \*.wav celem dalszej analizy. Łącznie zgromadzono prawie 59 godzin nagrań testowych.

By stworzyć własną bazę referencyjną ENF, wykorzystano komputer stacjonarny z profesjonalną kartą dźwiękową RME i połączonym z jej wejściem liniowym próbnikiem przystosowanym do akwizycji sygnału przydźwięku. Przy pomocy oprogramowania Adobe Audition zarejestrowano w podany sposób łącznie prawie 473 godziny nagrań w plikach formatu PCM \*.wav, mono, z próbkowaniem 200 Hz i rozdzielczością 16 bitów [6]. Na tej podstawie stworzono bazę referencyjną zawierającą obliczone chwilowe wartości częstotliwości prądu w sieci elektroenergetycznej wraz z oznaczeniem daty i czasu rejestracji. Na rycinie 1 zaprezentowano sposób akwizycji nagrań testowych i bazy referencyjnej ENF. Dodatkowo dysponowano wzorcowymi danymi z Polskich Sieci Energetycznych S.A. w postaci plików, które zawierały dla każdej sekundy wartość odchyłki od częstotliwości zadanej, odpowiadające łącznie 192 godzinom rejestracji.

### 2.2. Metodyka analizy częstotliwości w sieci elektroenergetycznej

Częstotliwość to najistotniejszy parametr systemów elektroenergetycznych pracujących synchronicznie, takich jak UCTE/CENTREL [3, 9]. Wartość częstotliwości zadanej, poza okresami korekty, wynosi 50 Hz. Jeżeli chwilowa odchyłka od tej częstotliwości nie przekroczy  $\pm 0,050$  Hz, wówczas warunki pracy systemu uznaje się za normalne. Jeżeli odchyłka ta zawiera się w granicach od 0,050 do 0,150 Hz, to warunki pracy uznaje się za zakłócone, lecz możliwe do skorygowania [3]. W ogólnym przypadku można przyjąć, że chwilowa wartość częstotliwości prądu w sieci elektroenergetycznej ma wartość:

$$F_t = F_0 + F [Hz], \quad \{1\}$$

gdzie:  $F_t$  – chwilowa wartość częstotliwości prądu w sieci elektroenergetycznej,  $F_0$  – wartość częstotliwości zadanej,  $F$  – wartość odchyłki od częstotliwości zadanej.

Odchylenia od częstotliwości zadanej spowodowane są różnicą pomiędzy zapotrzebowaniem na energię elektryczną a jej produkcją. W związku z tym podejmowane są środki mające na celu kontrolę pracy systemu elektro-

energetycznego, w tym także odczyt chwilowej wartości częstotliwości [3, 9]. Na rycinie 2 przedstawiono zmiany częstotliwości prądu w sieci elektroenergetycznej obliczone na podstawie nagrań zarejestrowanych w ciągu jednej doby symultanicznie w dwóch miejscowościach położonych na terenie województwa małopolskiego i oddalonych od siebie o 50 km.

Jak można zauważyć, zmiany częstotliwości dla dwóch różnych lokalizacji są identyczne. Wartość średnia częstotliwości dla tego okresu wyniosła 50,002 Hz, a odchylenie standardowe 0,016 Hz. Na podstawie analizy zgromadzonej bazy referencyjnej ENF stwierdzono, że rozkład chwilowych wartości częstotliwości prądu w sieci elektroenergetycznej jest zbliżony do normalnego. Na rycinie 3 zaprezentowano zmiany częstotliwości wyznaczone dla tego samego okresu, tj. od godziny 5:00 do 8:00, w ciągu trzech dni różnych tygodni.

Przedstawione na rycinie 3 przebiegi zdecydowanie różnią się od siebie, co przemawia za twierdzeniem o przypadkowych zmianach częstotliwości w sieci elektroenergetycznej.

Ujednociono rozdzielczość amplitudy wszystkich nagrań testowych do 16 bitów oraz zmniejszono częstotliwość próbkowania każdego z nich do 600, 400 i 200 Hz w celu analizy, odpowiednio, trzeciej (150 Hz), drugiej (100 Hz) i pierwszej (50 Hz) harmonicznej analizowanego sygnału przydźwięku. Nagrania poddano również filtracji pasmowo-przepustowej filtrem Butterwortha w wąskim paśmie wokół wartości analizowanej harmonicznej. Na podstawie opracowanych algorytmów do automatycznej weryfikacji daty i czasu rejestracji nagrania oraz detekcji nieciągłości stworzono oprogramowanie, wykorzystując do tego celu środowisko MATLAB. Aby wyznaczyć chwilową wartość częstotliwości  $F_{t\_rec(i)}$  sygnału przydźwięku w nagraniu, zastosowano transformację Fouriera w przesuwanych oknach czasowych [8] i uzyskano dużą rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości wynoszącą 0,001 Hz. Optymalną rozdzielczość w dziedzinie czasu zapewniono, wyznaczając  $F_{t\_rec(i)}$  w oknach o dostosowywanej długości, przeważnie od 1 do 10 s. Dodatkowo, gdy analizowany sygnał cechował się bardzo małą wartością stosunku  $SNR$  (ang. signal-to-noise ratio), obliczeń  $F_{t\_rec(i)}$  dokonywano w bardzo wąskim i możliwym do wyboru paśmie, najczęściej od  $\pm 0,05$  do  $\pm 0,2$  Hz wokół danej harmonicznej. W oknie czasowym przesuwającym się wzdłuż sygnału od początku do końca, obliczano kolejną wartość częstotliwości i zapisywano ją do wektora danych.

Algorytm do automatycznego przeszukiwania i porównywania obliczonych częstotliwości sygnału przydźwięku sieciowego z nagrań testowych względem bazy ENF opiera się na dwóch niezależnych metodach. Pierwsza wyznacza korelację wektora danych, zawierającego obliczone częstotliwości przydźwięku z kolejnymi frag-

mentami (wektorami) bazy ENF. Wektory te przesuwają się krokowo względem siebie według zależności:

$$R_{xy}(m) = E x(n)y(n-m), \quad \{2\}$$

gdzie  $x$  i  $y$  to analizowane wektory danych,  $m$  i  $n$  indeksy, a  $E$  to wartość oczekiwana [6, 11]. Druga metoda szacuje odległość między dwoma porównywanymi wektorami danych, wykorzystując ich normy, co można zapisać jako:

$$D_{xy} = \|x - y\| / \|x\| \quad \{3\}$$

[10, 11].

Na podstawie zapisanej w bazie informacji o czasie jej rejestracji, algorytm wyznacza przedziały czasowe z największym stopniem dopasowania na podstawie maksymalnego współczynnika korelacji i minimalnej odległości. Nieciągłości w nagraniu mogą powstać na skutek zatrzymania rejestracji (pauzy) albo np. usunięcia lub dodania fragmentów nagrania w oprogramowaniu do edycji plików dźwiękowych. Algorytm detekcji ewentualnej nieciągłości bazuje na analizie zmian mocy sygnału przydźwięku i jego częstotliwości w zadanych przedziałach czasu, uwzględniając wartości statystycznie odstające. Można to zapisać jako:

$$X_{pwr}(n_1, n_2) = \frac{1}{(n_2 - n_1)} x^2(n), \quad \{4\}$$

gdzie  $X_{pwr}$  to moc sygnału  $x$  obliczana w przedziale od  $n_1$  do  $n_2$  [10]. Schemat blokowy algorytmów zaprezentowano na rysunku 4. Zastosowania innych algorytmów do ekstrakcji i analizy przydźwięku w nagraniach cyfrowych znaleźć można również m.in. w [2] i [4].

### 3. Wyniki

Na podstawie zarejestrowanych nagrań testowych i zgromadzonych baz referencyjnych oraz ich analizy z wykorzystaniem opracowanych algorytmów ustalono, że:

- urządzenia zasilane wyłącznie bateryjnie są w stanie rejestrować w obrębie swoich nagrań przydźwięk sieciowy, zarówno na obszarach o rzadkim, jak i gęstym pokryciu siecią elektroenergetyczną (patrz też [7]);
- rejestratory cyfrowe Sony ICD-B7 i Panasonic RR-US395 oraz telefon Nokia 6610 w ogóle nie rejestrują przydźwięku, pozostałe badane urządzenia rejestrowały przydźwięk w swoich nagraniach;
- analiza nagrań z rejestratorów Olympus DS-50, Olympus DS-30, Sony ICD-MS515, TEAC MP-114 i LG XNOTE LS50a wykazała przesunięcie częstotliwości sygnału przydźwięku względem osi częstotliwości w niektórych przypadkach nawet o  $-0,07$  Hz, niezależnie od kompresji sygnału, co wynika prawdopodobnie z jakości użytych układów elektronicznych; sygnał taki jednak nadal pozwala na badania autentyczności nagrania;



- przemieszczanie rejestratora w trakcie nagrywania nawet na odległość rzędu kilku metrów może powodować zmianę amplitudy rejestrowanego przydźwięku;
- na poprawność weryfikacji daty i czasu rejestracji nagrania wpływa przede wszystkim długość zarejestrowanego w jego obrębie przydźwięku, poziom zakłóceń i długość okna czasowego stosowanego do obliczeń *FFT* (patrz tabela I);
- na poprawność automatycznej detekcji nieciągłości w nagraniu wpływa poziom zakłóceń, przy czym optymalne rezultaty otrzymywano dla *SNR*  $-20$  dB;
- do weryfikacji czasu rejestracji nagrania można wykorzystać pierwszą i wyższe harmoniczne sygnału przydźwięku (np. 100 Hz dla Sony MZ-NH900, TRAK DMP575, TEAC MP-114);
- rozkład chwilowych wartości częstotliwości prądu w sieci energetycznej jest zbliżony do rozkładu normalnego;
- zmiana jakości nagrań nie miała wpływu na możliwość rejestracji przydźwięku dla danego urządzenia;
- możliwa jest rejestracja w nagraniu przebiegów o częstotliwości średniej poniżej lub powyżej sygnału przydźwięku i o podobnej charakterystyce, co spowodowane jest prawdopodobnie wpływem sąsiadujących urządzeń zasilanych sieciowo.

Na podstawie przeprowadzonych analiz oszacowano kryteria, jakie musi spełniać przydźwięk, aby możliwa była jego poprawna ekstrakcja z nagrania i wiarygodna weryfikacja względem bazy referencyjnej. W tabeli I przedstawiono wpływ zakłóceń na minimalny wymagany czas rejestracji sygnału przydźwięku, który pozwala na prawidłową weryfikację względem bazy, współczynniki korelacji dla najlepszego dopasowania oraz błędy *mean quadratic error (MQE)* dla podanych w tabeli wartości *SNR* i okien czasowych. Dla nagrań o dużym poziomie zakłóceń, tj. dla małej wartości *SNR*, wymagane jest, aby zawarty w nich przydźwięk posiadał dłuższy czas rejestracji. W celu eliminacji zakłóceń o charakterze impulsowym i wygładzenia przebiegu można stosować dłuższe okna czasowe. Jednakże przyjęcie zbyt długiego okna może powodować utratę istotnych szczegółów, a w konsekwencji zwiększyć prawdopodobieństwo błędnej weryfikacji.

Na rycinie 5 przedstawiono przykładową wizualizację wyniku weryfikacji czasu rejestracji nagrania na podstawie wyekstrahowanego z nagrania przydźwięku i obliczonych częstotliwości.

Badania wykazały, że oprócz oczywistej utraty części sygnału przydźwięku w wyniku usunięcia fragmentu nagrania lub zatrzymania jego rejestracji, w miejscu nieciągłości zachodzi efekt tzw. przecieku widma [8], który przedstawiono na rycinie 6. Objawia się on „rozmyciem” skoncentrowanego blisko wokół 50 Hz sygnału na sąsiednie częstotliwości, zanikając w bardzo wąskim pa-

mie w miejscu braku ciągłości. Zjawisko to zaobserwowano także w przypadku montażu dokonanego np. poprzez sklejenie kilku fragmentów nagrań. Na podstawie tych obserwacji możliwa jest detekcja braków ciągłości zapisu. Jeśli nagrania rejestrowano w różnych warunkach lub za pomocą innych urządzeń, wówczas bardzo prawdopodobne jest, że zestawione fragmenty będą znacznie różnić się poziomem mocy przydźwięku.

Przeprowadzone badania wykazały, że optymalna detekcja nieciągłości w oparciu o opracowany algorytm możliwa jest dla *SNR* niemniejszego niż  $-20$  dB. Poniżej tej wartości liczba fałszywie wyznaczonych nieciągłości gwałtownie rośnie w związku z intensywnością zakłóceń, głównie o charakterze impulsowym. Na rycinie 7 przedstawiono wizualizację z badania ciągłości nagrania, w którym usunięto kilkusekundowy fragment, w oparciu o zarejestrowany w jego obrębie przydźwięk.

Oprócz prezentacji graficznej, stworzone na bazie opisanych wyżej algorytmów oprogramowanie podaje wyniki liczbowe z przeprowadzonej analizy porównawczej i badania ciągłości, w tym: próbkowania, kwantyzacje i długości plików dźwiękowych, wartości średnie częstotliwości i odchylenia standardowe dla ENF, maksymalny współczynnik korelacji i minimalną odległość, godzinę i minutę początku i końca w bazie danych z najlepszym dopasowaniem, błąd *mean quadratic error* i *mean absolute error* między danymi analizowanymi i referencyjnymi oraz miejsce występowania ewentualnej nieciągłości w nagraniu.

Walidację opracowanych algorytmów przeprowadzono z uwzględnieniem normy EN ISO/IEC 17025. W tym celu wykorzystano zebrane nagrania i dane wzorcowe z PSE S.A. W ramach walidacji zbadano m.in. powtarzalność, odtwarzalność, zakres pomiarowy i wykrywalność poprzez wyznaczenie minimalnych wymagań co do przydźwięku utrwalonego w nagraniu, a dokładność i niepewność pomiaru na podstawie obliczeń stopnia dopasowania i błędów.

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że rejestratory cyfrowe zasilane zarówno za pomocą baterii, jak i z sieci elektroenergetycznej, umożliwiają utrwalenie w obrębie swoich nagrań przydźwięku sieciowego oraz jego harmonicznych. Sygnały te mogą być wykorzystane do weryfikacji daty i czasu rejestracji nagrania oraz analizy jego ciągłości, muszą jednak spełniać kryteria, których oszacowanie zaprezentowano w niniejszej pracy. Niektóre typy urządzeń nie umożliwiają rejestracji sygnału przydźwięku sieciowego w ogóle, inne zaś wprowadzają przesunięcie jego przebiegu względem częstotliwości rzeczywistych. Biorąc pod uwagę kryterium ENF oraz zaobserwowane właściwości nagrań testowych, opraco-

wano algorytmy i oprogramowanie, które pozwala na pełną automatyzację czynności związanych z detekcją przydźwięku, przeszukiwaniem bazy referencyjnej, weryfikacją daty i czasu rejestracji nagrania oraz analizą jego ciągłości. Zastępuje to czasochłonną i stosowaną dotychczas metodę porównywania charakterystyki przydźwięku wyświetlanego na spektrogramie z kolejnymi fragmentami bazy. Oprogramowanie to może współpracować z bazą referencyjną zgromadzoną na zwykłym komputerze wyposażonym w kartę dźwiękową. Pozwala ono również na wykorzystanie wzorcowych i oficjalnych danych rejestrowanych przez operatora sieci elektroenergetycznej, co przyczynia się do większej wiarygodności uzyskanych wyników dla potrzeb wymiaru sprawiedliwości.