

Rafał Korycki

Badanie autentyczności nagrań cyfrowych z wykorzystaniem analizy wahań częstotliwości prądu sieci energetycznej

Badania autentyczności zapisów fonicznych stanowią istotny element współczesnej kryminalistyki. Nagrania utrwalone w sposób analogowy na nośnikach magnetycznych jeszcze kilka lat temu stanowiły większość badanych materiałów. Wykrywanie śladów ingerencji w ciągłość zapisu wymagało w tym przypadku zastosowania analizy przebiegu czasowego i spektrogramu sygnału fonicznego, jak również zapisu pola magnetycznego utrwalonego na samej taśmie. Wraz z upowszechnieniem się nagrań cyfrowych¹ ujawnianie śladów wykonanego montażu znacznie się skomplikowało, a w wielu przypadkach stało się wręcz niemożliwe. Punktem zwrotnym okazało się zastosowanie analizy wahań częstotliwości prądu sieci elektroenergetycznej. Zaobserwowano bowiem silną korelację zmian częstotliwości prądu (ENF – *Electric Network Frequency*) w różnych obszarach podłączonych do tej samej sieci. Wykorzystano także fakt rejestrowania sygnału sieci energetycznej przez niektóre urządzenia nagrywające.

Z punktu widzenia stosowania metody, kluczowe jest wyodrębnienie sygnału sieci energetycznej z nagrania dowodowego, wyznaczenie chwilowych wartości częstotliwości oraz porównanie ich z wartościami pochodzącymi z bazy danych. Pomiaru można dokonywać zarówno korzystając z metod opartych o transformację Fouriera, jak i innych rozwiązań, takich jak modelowanie parametryczne, metody podprzestrzeni, czy wyznaczanie częstotliwości na podstawie pomiaru czasu z definicji – np. w miejscach, w których sygnał przechodzi przez zero (tzw. *zero-crossing method*).

Analiza zmian częstotliwości prądu sieci energetycznej

Prąd przemienny płynący w instalacji elektrycznej oraz w urządzeniach podłączonych do niej generuje zmienne pole elektromagnetyczne. Częstotliwość zmian pola wynosi 50 lub 60 Hz i zależy od systemu energetycznego obejmującego dany obszar. Polski system energetyczny jest częścią zgrupowania systemów przesyłowych Europy oraz północnej Afryki, które pracują ze sobą synchronicznie, to znaczy z tą samą częstotliwością prądu w sieci, wynoszącą 50 Hz. Operatorzy tych systemów zrzeszeni są w Unii ds. Koordynacji Przesyłu Energii Elektrycznej (UCTE – *Union for the Coordination of Transmission of Electricity*) [1]. W Polsce operatorem systemu przesyłowego jest PSE – Operator S.A.

Podobnie jak przemienny prąd płynący w przewodniku generuje zmienne pole elektromagnetyczne, tak zmienne pole elektromagnetyczne powoduje indukowanie przemiennego prądu w przewodniku znajdującym się w zasięgu tego pola. Ze względu na sinusoidalny charakter zmian amplitudy prądu sieci energetycznej oraz na częstotliwość (50 Hz) pokrywającą się z pasmem akustycznym (20 Hz - 20 000 Hz), istnieje

¹ Popularne określenie sygnały cyfrowe odnosi się do sygnałów próbkowanych w dziedzinie czasu i skwantowanych w dziedzinie wartości. Oznacza to, że sygnały posiadają swoją reprezentację jedynie w określonych chwilach czasu, których liczba zależy od częstotliwości próbkowania. Przykładowo, dla częstotliwości próbkowania 44 100 Hz na każdą sekundę sygnału przypada $n = 44\,100$ próbek.

możliwość indukcji prądu o tej częstotliwości w elektronicznych elementach bloków wzmacniaczy sygnałów akustycznych, znajdujących się w urządzeniach rejestrujących.

Odchylenie częstotliwości prądu sieci energetycznej od wartości zadanej powodowane jest różnicą między obciążeniem systemu energetycznego, a wytwarzaniem energii elektrycznej w elektrowniach. Energia w systemie energetycznym nie może być magazynowana, wobec tego zapotrzebowanie musi być pokryte w czasie rzeczywistym energią wyprodukowaną w elektrowniach. Każde niebilansowanie wytwarzania z zapotrzebowaniem powoduje odchylenie częstotliwości od wartości zadanej. Częstotliwość rośnie, jeśli w systemie jest nadmiar mocy wyprodukowanej, lub maleje, jeśli zapotrzebowanie przewyższa produkcję [1 i 2].

Przeprowadzone dotychczas badania [3 i 4] pokazują, że powyższe odchylenia mają charakter przypadkowy, a ich wartości wykazują silną korelację w obrębie całego obszaru synchronicznego. W związku z tym, wartości częstotliwości prądu sieci energetycznej zmierzone w różnych lokalizacjach na terenie tego samego obszaru synchronicznego (np. w Brukseli, Warszawie czy Bukareszcie) będą identyczne (z dokładnością do pewnego nieznacznego błędu Δ , który przy stosowaniu opisywanej metody można pominąć²).

Zasady stosowania analizy wahań częstotliwości prądu sieci elektroenergetycznej

Zastosowanie powyższej metody sprowadza się do ekstrakcji z nagrania dowodowego sygnału indukowanego z sieci energetycznej oraz precyzyjnego pomiaru wartości częstotliwości zbliżonej do 50 Hz. Uzyskane wartości porównuje się dla każdej chwili czasowej (np. $t = 1$ sek.) z bazą danych – własną lub pochodzącą od operatora systemu energetycznego. Pełna synchronizacja, czyli zgodność sekwencji zmian wartości częstotliwości z bazy danych z wartościami uzyskanymi z nagrania dowodowego, pozwala na potwierdzenie autentyczności nagrania dowodowego. Natomiast synchronizacja jedynie fragmentów nagrania daje podstawy do zakwestionowania integralności zapisu i podejrzenia wykonania montażu.

Omawianą metodę można stosować w stosunku do nagrań cyfrowych, w których został zarejestrowany sygnał o częstotliwości sieci energetycznej. Zewnętrzne pole elektromagnetyczne traktowane jest przez producentów rejestratorów dźwięku jako potencjalne źródło zakłóceń. W związku z tym, urządzenia konstruowane są w taki sposób, aby wyeliminować, lub przynajmniej ograniczyć do minimum, możliwość nagrywania zakłóceń. Ponadto, w wielu przypadkach stosowane są filtry cyfrowe odcinające sygnały o częstotliwościach poniżej kilkuset Hz, co uniemożliwia rejestrację sygnału pochodzącego z sieci energetycznej. W przypadku każdego badania konieczne jest zatem indywidualne sprawdzenie parametrów rejestratora i zastosowanego w nim algorytmu zapisu oraz kompresji sygnału mowy w celu oszacowania ich wpływu na możliwość rejestracji sygnału sieci energetycznej.

² Można z pewnym uproszczeniem przyjąć, że stosowanie metody sprowadza się w ogólności do porównania trendu zmian wartości częstotliwości prądu sieci energetycznej, w związku z tym niewielkie odchylenia wartości mierzonych wielkości nie mają znaczącego wpływu na wynik korelacji wzorców z materiału dowodowego i porównawczego.

Ograniczenia związane ze stosowaniem analizy wahań częstotliwości prądu sieci elektroenergetycznej

Możliwość wykrycia sygnału sieci energetycznej zależy od możliwości jego rejestracji, tzn. fakt rejestracji sygnału podczas realizacji procesu nagrywania pozwala na wykrycie tego sygnału podczas wstępnej analizy dokonywanej przy pomocy spektrogramu o wysokiej rozdzielczości (ok. 4096 - 8192 próbek), po uprzedniej konwersji częstotliwości próbkowania do wartości:

$$f_{ds} = 2 \cdot f_{sieci\ energetycznej} + 20\%$$

Możliwość rejestracji sygnału sieci energetycznej w nagraniu zależy m.in. od następujących czynników:

- rodzaju zasilania urządzenia rejestrującego (w większości przypadków zasilanie sieciowe zwiększa prawdopodobieństwo rejestracji sygnału sieci energetycznej),
- rodzaju algorytmu kompresji zastosowanego w urządzeniu podczas zapisu nagrania do pliku,
- filtrów górnoprzepustowych oraz układów redukcji szumu i zakłóceń,
- rodzaju użytego mikrofonu, długości i rodzaju połączenia przewodowego mikrofonu z rejestratorem oraz struktury bloków wzmacniaczy analogowych występujących przed układami przetworników analogowo-cyfrowych,
- lokalizacji rejestratora, w szczególności odległości od urządzeń zasilanych z sieci energetycznej, odległości od sieci strukturalnej lub linii wysokiego napięcia.

Istotną z punktu widzenia stosowania metody jest możliwość dokładnej ekstrakcji sygnału sieci energetycznej z nagrania dowodowego oraz porównania chwilowych wartości wyznaczonych częstotliwości z wartościami pochodzącymi z bazy danych. Ograniczenia związane z ekstrakcją i pomiarem częstotliwości to między innymi:

- występowanie więcej niż jednego sygnału sinusoidalnego w zakresie od 48 do 52 Hz,
- występowanie zakłóceń o charakterze impulsowym lub innych zmiennych sygnałów szerokopasmowych,
- stosunek sygnału do szumu w zakresie od 48 do 52 Hz.

Występują również ograniczenia związane z porównywaniem wartości, takie jak:

- krótki czas trwania materiału dowodowego,
- krótki czas upływający między montażem aparatury w różnych miejscach,
- niestabilność pracy zegara³ przetwornika analogowo-cyfrowego w urządzeniu rejestrującym,
- błędy układów kodowania powodujące „gubienie ramek”⁴ rejestrowanego sygnału.

³ Stabilność częstotliwości pracy zegara przetwornika ma bezpośredni wpływ na równomierność próbkowania. Zmiany wartości częstotliwości próbkowania f_p wpływają z kolei na dokładność pomiaru częstotliwości sygnałów rejestrowanych przez urządzenie nagrywające. Przykładowo, nieznaczne zmniejszenie wartości częstotliwości f_p w dyktafonie spowoduje podwyższenie wartości częstotliwości sygnału sieci energetycznej mierzonego na podstawie zarejestrowanego nagrania.

⁴ Większość algorytmów wykorzystujących kompresję stratną do kodowania i zapisu dźwięku wykorzystuje podział sygnału na ramki o długości ok. kilkudziesięciu milisekund. „Zgubienie” takiej ramki, np. w czasie zapisu, spowoduje powstanie zjawiska podobnego do wykasowania fragmentu nagrania.

W niektórych przypadkach obserwuje się sygnał sieci energetycznej o częstotliwości spoza zakresu 48 - 52 Hz. Najczęstszą przyczyną powstawania takich anomalii jest błędnie funkcjonujący układ zegarowy w urządzeniu rejestrującym, który ma wpływ na niewłaściwą wartość częstotliwości próbkowania. Stosowne poprawki można w takim przypadku wprowadzić na etapie pomiaru i porównywania wartości częstotliwości prądu sieci energetycznej.

Materiałem dowodowym może być plik dźwiękowy zapisany na nośniku cyfrowym lub nagranie cyfrowe na nośniku magnetycznym. Ze względu na niezmiennosc materiału dowodowego w czasie, możliwa jest pełna odtwarzalność metody – zarówno w zakresie pomiaru wartości częstotliwości, jak i porównywania sekwencji wartości z bazą danych. Warunkiem jest wykorzystanie tych samych algorytmów oraz tych samych parametrów, jak chociażby rozmiar okna, rozdzielczość transformacji itp. Wyniki są odporne na czynniki zewnętrzne oraz niezależne od wykorzystanego oprogramowania (z dokładnością do wartości błędu przetwarzania).

Niepewność uzyskanych wyników uzależniona jest od wykorzystanej metody pomiaru częstotliwości sygnału sieci energetycznej oraz od parametrów bazy danych. Korzystanie z bazy PSE – Operator S.A. pozwala na określenie dolnego ograniczenia dla błędu pomiaru częstotliwości [$f = 1\text{mHz}$] oraz czasu [$t = 1\text{s}$]. Przy zapewnieniu rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości na tym samym poziomie, co rozdzielczość bazy danych, teoretyczna dokładność detekcji miejsca nieciągłości wynosi 1 sekundę.

Omawianej metody nie powinno się stosować w odniesieniu do nagrań zapisanych w sposób analogowy na taśmie magnetycznej. Wiąże się to z fluktuacjami prędkości przesuwu taśmy, powodującymi przesunięcia częstotliwości mierzonego sygnału o wartości niekiedy znacznie przekraczającej zakres wahań częstotliwości prądu sieci energetycznej. Typowa wartość nierównomierności przesuwu taśmy dla profesjonalnych magnetofonów kasetowych (np. Technics RS – B965, Pioneer CT – W806DR)⁵ wynosi ok. 0,03% - 0,09%, co przy założeniu liniowego wzrostu częstotliwości w stosunku do zwiększenia prędkości odtwarzania daje bezwzględny błąd pomiaru na poziomie ok. 15 - 45 mHz. Należy nadmienić, że typowe wartości odchylenia częstotliwości prądu sieci energetycznej od częstotliwości znamionowej rejestrowane są na poziomie ok. ± 100 mHz. Natomiast rejestratory przenośne charakteryzują się współczynnikiem nierównomierności przesuwu taśmy znacznie przekraczającym 1% (co daje $\Delta > 500$ mHz). Powyższa wartość może dodatkowo ulec zwiększeniu na skutek rozładowywania się baterii zasilających urządzenie rejestrujące.

Pomiar wartości częstotliwości prądu sieci energetycznej

Badania autentyczności nagrań cyfrowych w oparciu o analizę wahań częstotliwości prądu sieci energetycznej wykonywane są w następujących etapach [5]:

- sprawdzenie występowania sygnału sieci energetycznej,
- w przypadku występowania sygnału sieci energetycznej – wyznaczenie chwilowych wartości częstotliwości dla okresu $t = 1$ sekunda, lub dla mniejszych wartości t w przypadku dysponowania dokładniejszą bazą danych częstotliwości prądu sieci energetycznej,

⁵ Wartości zostały podane na podstawie danych technicznych zamieszczonych przez producentów wymienionych urządzeń w instrukcjach obsługi.

- porównanie wyznaczonych wartości częstotliwości z bazą danych.

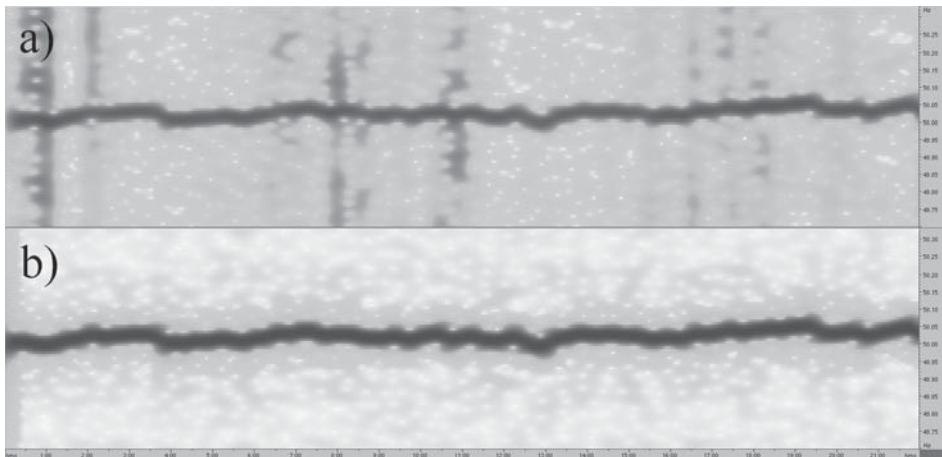
Porównanie spektrogramów to najszybsza metoda pozwalająca na sprawdzenie występowania sygnału sieci energetycznej w nagraniu dowodowym. Wykonuje się ją przy wykorzystaniu dowolnego oprogramowania pozwalającego na wyznaczenie spektrogramu, czyli krótkoczasowej transformacji Fouriera (*Short-time Fourier Transform* – STFT). Po wczytaniu pliku z materiałem dowodowym wykonywane są następujące operacje:

- konwersja częstotliwości próbkowania nagrania dowodowego do wartości

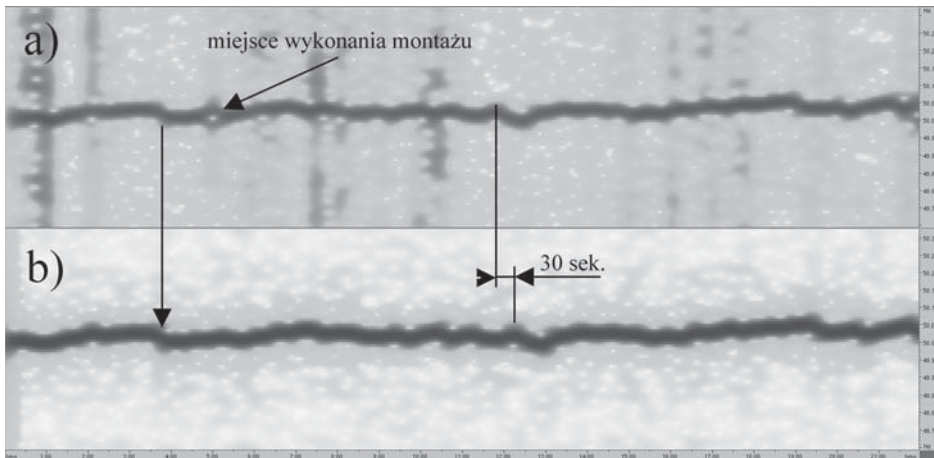
$$f_{ds} = 2 \cdot f_{sieci\ energetycznej} + 20\%$$

- wyznaczenie spektrogramu w oparciu o krótkoczasową transformację Fouriera z długim oknem analizy (>4096 próbek),
- analiza sygnałów sinusoidalnych w zakresie $f_{sieci\ energetycznej}$ i porównanie z odpowiednio wyskalowanym wykresem zmian częstotliwości prądu sieci energetycznej pochodzącym z bazy danych, np. z bazy operatora systemu energetycznego, lub z materiałem porównawczym (fot. 1 i 2).

Zgodność wzorców zmian wartości częstotliwości na wymienionych wykresach wskazuje na autentyczność nagrania i brak śladów ingerencji w jego ciągłość. Rozbieżności będące wynikiem miejscowej desynchronizacji przebiegów wartości zmian częstotliwości sygnału sieci energetycznej świadczą o braku ciągłości nagrania dowodowego.



Fot. 1. Porównanie spektrogramów: a) sygnału sieci energetycznej wyodrębnionego z materiału dowodowego; b) nagrania referencyjnego zarejestrowanego bezpośrednio z sieci energetycznej. Parametry analizy: okno Blackmanna o długości 8192 próbek, 50% nakładanie ramek.



Fot. 2. Porównanie spektrogramów: a) sygnału sieci energetycznej wyodrębnionego z materiału dowodowego poddanego montażowi; b) nagrania referencyjnego zarejestrowanego bezpośrednio z sieci energetycznej. Parametry analizy: okno Blackmanna o długości 8192 próbek, 50% nakładanie ramek. Z materiału dowodowego we wskazanym miejscu dokonano wycięcia 30 sekund nagrania. Widoczny jest brak synchronizacji zmian częstotliwości sygnału sieci energetycznej od miejsca, w którym wykonano montaż.

Transformacja Fouriera jest podstawowym narzędziem analizy częstotliwościowej sygnałów. Widmo Fouriera dla sygnałów ciągłych (np. sygnałów analogowych) zawierające informację o zawartości częstotliwościowej sygnału $x(t)$ opisywane jest zależnością:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

Innymi słowy, wartość $X(f)$ niesie informację o tym, ile zespolonej⁶ składowej harmonicznej $e^{j2\pi ft} = \cos(2\pi ft) + jsin(2\pi ft)$ o konkretnej częstotliwości f znajduje się w sygnale. Natomiast widmo Fouriera dla sygnałów dyskretnych, odpowiednie do analizy sygnałów cyfrowych, przedstawia wzór:

$$X(e^{j\Omega}) = \sum_{n=-\infty}^{N-1} x(n)e^{-j\Omega n} \quad \text{gdzie: } \Omega = 2\pi \frac{f}{f_p},$$

natomiast f_p jest częstotliwością próbkowania. Baza fourierowska ma swoje rozwinięcie: $e^{j\Omega n} = \cos(\Omega n) + jsin(\Omega n)$ [6]. Ze względu na konieczność odseparowania sygnału sieci energetycznej od pozostałych składowych nagrania dowodowego, zalecane jest wykonanie konwersji częstotliwości próbkowania do wartości:

$$f_{ds} = 2 \cdot f_{sieci\ energetycznej} + 20\%,$$

a następnie przeprowadzenie filtracji pasmowej w zakresie np. 48 - 52 Hz. Konieczne jest także nadpróbkowanie transformacji Fouriera, gdyż dla $N = 120$ próbek rozdzielczość transformacji wynosić będzie tylko

$$\Delta f = \frac{60}{120} \text{ Hz} = 500 \text{ mHz} ,$$

⁶ Liczba zespolona zawiera dwie składowe: rzeczywistą i urojoną (np. liczba postaci $2+j2$). Dla tak zapisanej liczby jej moduł wynosi: $|2 + j2| = \sqrt{2^2 + 2^2} = 2\sqrt{2}$, natomiast przesunięcie fazowe: $\frac{\pi}{4} = 45^\circ$. Wartość składowej urojonej j wynosi $\sqrt{-1}$.

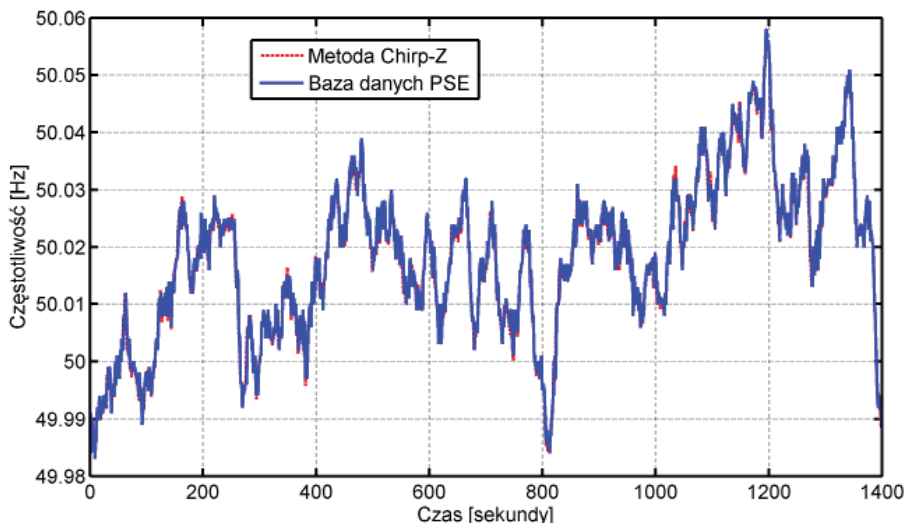
co jest znacznie poniżej wymagań dla opisywanej metody. Liczba próbek transformacji Fouriera, w przypadku konieczności zapewnienia rozdzielczości na poziomie 1 mHz powinna wynosić teoretycznie:

$$N_{int} = \frac{f_{ds}}{2 \cdot \Delta f} = \frac{120 \text{ Hz}}{2 \cdot 1 \text{ mHz}} = 60000$$

W celu wyznaczenia częstotliwości sygnału sieci energetycznej można zastosować dyskretną transformację „świergotową” (*Chip-Z Transform – CZT*). Wykorzystuje się ją do obliczania widma Fouriera w zadanym paśmie częstotliwości z dowolną rozdzielczością zdefiniowaną przez użytkownika. Mówiąc inaczej, stanowi ona „lupe” w dziedzinie częstotliwości [7, 8 i 9]. W przypadku konieczności wyznaczenia dyskretnej transformacji sygnału Fouriera $x(n)$ o długości N , dla $M+1$ częstotliwości unormowanych: $f_k = f_0 + k \cdot \Delta f$, gdzie $k = 0, \dots, M$, wówczas:

$$X(k) = W^{k^2} \sum_{n=0}^{N-1} [x(n)A^n W^{n^2}] W^{-(k-n)^2}$$

Powyższa zależność prezentuje spłot dwóch sygnałów: $y_1(n) = x(n)A^n W^{n^2}$ oraz $y_2(n) = W^{-n^2}$, czemu w dziedzinie częstotliwości odpowiada iloczyn widm tych sygnałów. Realizowana jest przy założeniach: $A \equiv e^{-f2\pi f_0}$, $W \equiv e^{-f2\pi \Delta f/2}$ oraz $2kn = n^2 + k^2 - (k-n)^2$ [6]. Wykorzystanie transformacji Chip-Z teoretycznie nie wymaga stosowania filtracji pasmowej. Ponadto, ze względu na wykonywanie obliczeń jedynie w zadanym paśmie, algorytm wykorzystujący transformację świergotową jest szybszy niż stosujący nadpróbkowaną transformację Fouriera. Na rysunku nr 1 zostało przedstawione porównanie zmian wartości częstotliwości prądu sieci energetycznej wyznaczonych przy wykorzystaniu metody Chip-Z z danymi z bazy danych PSE – Operator S.A. dla nagrania dowodowego o długości 23 minut, zarejestrowanego przy pomocy baterijnie zasilanego magnetofonu DAT z podłączonym zewnętrznym mikrofonem miniaturowym. Średni błąd bezwzględny wyznaczony na podstawie porównania danych wyniósł $\Delta_{\text{Chirp-Z}} = 0,81 \text{ mHz}$.



Rys. 3. Porównanie wartości częstotliwości prądu sieci energetycznej wyznaczonych przy pomocy transformacji Chirp-Z z wartościami z bazy danych PSE – Operator S.A.

Widmo można także wyznaczyć na podstawie estymaty⁷ funkcji autokorelacji $\mathbf{R}_{xx}(m)$ analizowanego sygnału $x(n)$. Wartości próbek estymaty tworzą macierz autokorelacji \mathbf{R}_{xx} . Można dla niej wyznaczyć wartości własne λ_k i wektory własne \mathbf{v}_k oraz przedstawić ją jako sumę macierzy elementarnych $\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T$ z wagami λ_k . Wektory własne są ortogonalne⁸ i rozpinają dwie dopełniające się przestrzenie: sygnału i szumu [6]. Wyznaczenie na podstawie \mathbf{R}_{xx} badanego sygnału jakiegokolwiek wektora leżącego w podprzestrzeni szumu pozwala na wyznaczenie częstotliwości sygnałów zgodnie z zasadą ortogonalności. Możliwe jest także wykorzystanie do estymacji częstotliwości sumy kilku sinusoid metody wykorzystującej macierz \mathbf{R}_{xx} . Wówczas aproksymuje⁹ się ją za pomocą sumy macierzy $\lambda_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T$ związanych wyłącznie z głównymi wektorami \mathbf{v}_k tej dekompozycji, leżącymi w podprzestrzeni sygnału. Taka estymata jest bardziej wiarygodna, ponieważ pozbawiona jest szkodliwego wpływu szumu. Jedną z metod, którą można wykorzystać do pomiaru częstotliwości sygnału sieci energetycznej, jest metoda ESPRIT (*Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques*). Algorytm działania metody jest następujący [6, 10, 11 i 12]:

- wyznaczyć estymatę funkcji autokorelacji $R_{y_0}(m)$ dla $m = 0, 1, \dots, M$ sygnału $y(n)$ oraz stworzyć macierze \mathbf{R}_{y_0, y_0} , \mathbf{R}_{y_0, y_1} ,
- zdekomponować macierz \mathbf{R}_{y_0, y_0} według wartości własnych oraz znaleźć najmniejszą wartość własną, którą przyjmuje się za estymatę wariancji szumu σ_s^2 ,
- utworzyć macierze: $\mathbf{C}_{y_0, y_0} = \mathbf{R}_{y_0, y_0} - \sigma_s^2 \mathbf{I}$ oraz $\mathbf{C}_{y_0, y_1} = \mathbf{R}_{y_0, y_1} - \sigma_s^2 \mathbf{J}$, gdzie \mathbf{I} = eye (M), \mathbf{J} – przesunięta macierz \mathbf{I} z zerami na pierwszym wierszu,
- wyznaczyć uogólnione wartości własne dla macierzy \mathbf{C}_{y_0, y_0} oraz \mathbf{C}_{y_0, y_1} : $\mathbf{D} = \text{eig}(\mathbf{C}_{y_0, y_0}, \mathbf{C}_{y_0, y_1})$,
- znaleźć częstotliwości składowe f_k na podstawie p wartości leżących na okręgu jednostkowym lub blisko niego; $M = 2p+1$, gdzie p stanowi liczbę składowych sinusoidalnych.

Na rysunku nr 4 przedstawione zostało porównanie zmian wartości częstotliwości prądu sieci energetycznej wyznaczonych przy wykorzystaniu metody ESPRIT z danymi z bazy danych PSE – Operator S.A. dla tego samego nagrania. Średni błąd bezwzględny wyniósł w tym przypadku $\Delta_{\text{ESPRIT}} = 1,32$ mHz. Opisana metoda, mimo mniejszej dokładności, cechuje się większą odpornością na zakłócenia w postaci szumu.

Metody czasowe pomiaru częstotliwości polegają na wyznaczeniu miejsc przejść sygnału przez zero (*Zero-crossing method*) i obliczeniu częstotliwości z definicji $f = 1/T$, gdzie T jest czasem trwania jednego okresu sygnału sinusoidalnego. Aby wyznaczyć czas trwania okresu sygnału, nie zaleca się stosowania konwersji częstotliwości próbkowania. Zamiast tego należy odseparować sygnał sieci energetycznej od nagrania dowodowego za pomocą filtrów pasmowo-przepustowych wysokiego rzędu¹⁰. Należy także stosować funkcje interpolacji¹¹, aby zwiększyć rozdzielczość wynikającą ze skwantowanych poziomów próbkowania sygnału. Możliwe jest także stosowanie krzywych

⁷ Estymacja to szacowanie rozkładów cech w populacji na podstawie cech jednostek wchodzących w skład losowo dobranej próby. <http://encyklopedia.pwn.pl>.

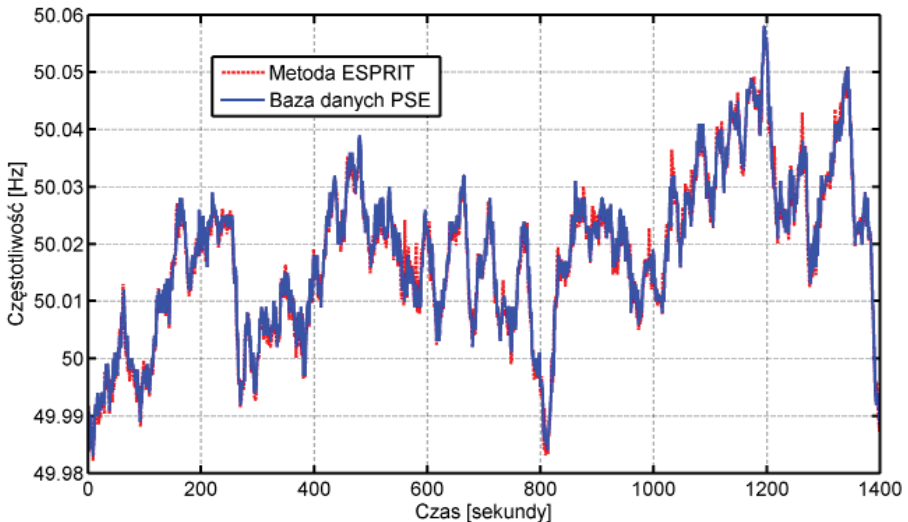
⁸ Ortogonalność to wspólna nazwa dla prostokątności i jej wszystkich uogólnień; mówi się m.in. o ortogonalnych krzywych, wektorach, macierzach, funkcjach i szeregach. <http://encyklopedia.pwn.pl>.

⁹ Aproksymacja to zastąpienie jednych wielkości matematycznych przez inne, przybliżone. <http://encyklopedia.pwn.pl>.

¹⁰ Rząd filtra określa złożoność układu; im większy rząd, tym więcej współczynników i elementów opóźniających tworzy filtr.

¹¹ Interpolacja to wyznaczenie w pewnym przedziale funkcji, która przyjmuje znane wartości dla danych liczb z tego przedziału. <http://encyklopedia.pwn.pl>.

aproxymacji i wyznaczanie miejsc przejść przez zero w przedziałach między próbkami [13, 14 i 15]. Analiza wahań częstotliwości prądu sieci elektroenergetycznej nie może być stosowana w przypadku, gdy w badanym nagraniu znajduje się więcej niż jeden sygnał sieci energetycznej.



Rys. 4. Porównanie wartości częstotliwości prądu sieci energetycznej wyznaczonych przy pomocy metody ESPRIT z wartościami z bazy danych PSE – Operator S.A.

Interpretacja wyników badań

Pierwszy etap badań obejmuje analizę nagrania pod kątem występowania sygnałów o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości sieci energetycznej (50 Hz lub 60 Hz). Realizowana jest konwersja częstotliwości próbkowania do minimum 120 Hz (lub 144 Hz w przypadku sygnałów o częstotliwości 60 Hz). W przypadku stwierdzenia więcej niż jednego sygnału sieci energetycznej w nagraniu dowodowym należy podjąć próbę odseparowania od siebie tych składowych za pomocą filtrów pasmowo-przepustowych wysokiego rzędu. Jeśli częstotliwości komponentów różnią się nieznacznie i separacja jest niemożliwa, należy podjąć próbę:

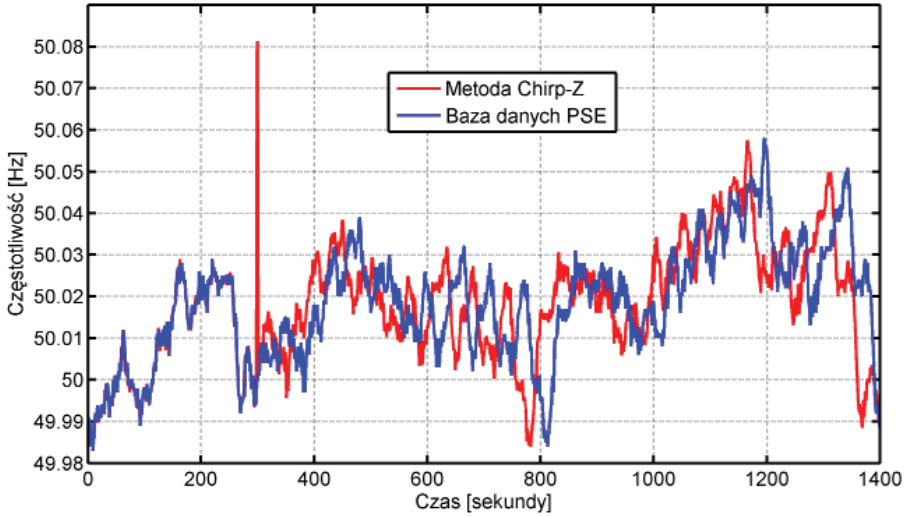
- analizy zmian częstotliwości prądu sieci energetycznej w oparciu o badanie spektrogramów,
- wyznaczenia częstotliwości za pomocą zmodyfikowanej metody pomiaru częstotliwości za pomocą metody Chirp-Z [8 i 9],
- wyznaczenia częstotliwości za pomocą metody ESPRIT dla $p > 1$ [10, 11 i 12].

Bez względu na wynik porównania należy zauważyć, że obecność więcej niż jednego sygnału sieci energetycznej wskazuje na możliwość wykonania kopiowania materiału dowodowego za pośrednictwem połączenia analogowego.

Po wykonaniu pomiaru częstotliwości prądu sieci energetycznej z materiału dowodowego należy porównać sekwencję zmian wartości częstotliwości z bazą danych (własną lub pochodzącą od operatora systemu energetycznego). Dysponując informacją o dacie i czasie rejestracji, należy odszukać odpowiadającą tym parametrom sekwencję w bazie danych i dokonać porównania z sekwencją wyznaczoną na podstawie materiału

dowodowego. Pełna zgodność świadczy o autentyczności nagrania. Zgodność fragmentów nagrania pokazuje, że tylko te fragmenty pozostają ciągłe i należy wyjaśnić powody powstania nieciągłości.

Na rysunku nr 3 zilustrowano wykresy zmian wartości częstotliwości dla nagrania, w którym dokonano montażu. W 5 minucie zapisu wycięto 30 sekund rozmowy. We wskazanym miejscu obserwuje się skokową zmianę wartości częstotliwości. Widoczny jest także brak synchronizacji zmian wartości częstotliwości od miejsca, w którym wykonano montaż (tzn. przesunięcie wykresu zmian wartości częstotliwości o 300 sekund w lewo).



Rys. 3. Porównanie wartości częstotliwości prądu sieci energetycznej wyznaczonych przy pomocy transformacji Chirp-Z z wartościami z bazy danych PSE – Operator S.A. Z materiału dowodowego w 300 sekundzie (5 minucie) zapisu dokonano wycięcia 30 sekund nagrania. Widoczny jest brak synchronizacji zmian częstotliwości sygnału sieci energetycznej od miejsca, w którym wykonano montaż.

W przypadku braku informacji o czasie rejestracji, konieczne jest wyszukanie sekwencji częstotliwości w bazie danych. Należy wybrać dowolny wektor N danych częstotliwości i dokonać przeszukania bazy danych, biorąc pod uwagę jedno z kryteriów: błąd średniokwadratowy (MSE) lub współczynnik korelacji. Wektor N danych należy wybrać w taki sposób, by nie występowały żadne zaburzenia amplitudy i fazy sygnału, a zakres zmian częstotliwości mieścił się w zakresie zmian uznawanych przez UCTE.

Wynikiem zastosowanej metody jest informacja o liczbie występujących sygnałów o częstotliwości sieci energetycznej, dacie i czasie rejestracji materiału dowodowego oraz o liczbie fragmentów nagrania, które mogą zostać uznane za ciągłe. W przypadku stwierdzenia więcej niż jednego ciągłego fragmentu nagrania, należy stwierdzić ingerencję w ciągłość zapisu (jeśli nie występują inne okoliczności usprawiedliwiająca powstanie powyższego zjawiska). Podczas analizy nagrania należy zwrócić uwagę na charakterystykę widmową materiału dowodowego w zakresie małych częstotliwości, w szczególności na zmniejszenie gęstości widma szumu w paśmie zbliżonym do częstotliwości sieci energetycznej. Może to świadczyć o celowej eliminacji sygnału sieci z nagrania dowodowego.

Literatura

1. Aiello M., Cataliotti A., *Chirp-Z Transform-Based Synchronizer for Power System Measurements*, „IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement” 2005, nr 54 (3).
2. Biernacka I., Korycki R., Rzeszotarski J., *Analiza wahań częstotliwości prądu sieciowego w badaniach autentyczności nagrań cyfrowych*, „Problemy Kryminalistyki” 2007, nr 258.
3. Flandrin P., Auger F., Chassande-Mottin E., *Time-Frequency Reassignment: From Principles to Algorithms*, Tempe, Arizona 2003, CRC Press.
4. Grigoras C., *Applications of ENF criterion in forensic audio, video, computer and telecommunication analysis*, „Forensic Science International” 2007, nr 167.
5. Grigoras C., *Digital Audio Recording Analysis: The Electric Network Frequency (ENF) Criterion*, „The International Journal of Speech Language and the Law” 2005, nr 12 (2).
6. Korycki R., *Zastosowanie metod czasowo-częstotliwościowych w badaniach autentyczności cyfrowych nagrań fonicznych*, XIII Międzynarodowe Sympozjum Reżyserii i Inżynierii Dźwięku ISSET 2009.
7. Leonowicz Z., Lobos T., *Parametric Spectral Estimation for Power Quality Assessment w: Proc. The International Conference on Computer as a Tool*, Warszawa 2007.
8. Nicolalde D., Apolinario J., *Evaluating digital audio authenticity with spectral distances and ENF phase change*, w: *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Taipei 2009.
9. Papandreou-Suppappola A., *Application in Time-Frequency Signal Processing*. Tempe, Arizona 2003, CRC Press.
10. Salcic Z., Mikhael R., *A new method for instantaneous power system frequency measurement using reference points detection*, „Electric Power Systems Research” 2000, vol. 55 (2).
11. Stoica P., Soderstrom T., *Statistical analysis of MUSIC and ESPRIT estimates of sinusoidal frequencies*, w: *Proc. The IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Toronto 1991, nr 5.
12. Tjader A., Gu I., Bollen M., Ronnberg S., *Performance evaluation for frequency estimation of transients using the ESPRIT: Measured noise versus white noise*, w: *Proc. 13th International Conference Of Harmonics and Quality of Power*, Wollongong 2008.
13. C. Zang, L. Dai, H. Zheng, J. He, *Using frequency zoom technology to realize high precision and adaptive frequency measurement for power system*, w: *Power System Technology. International Conference – PowerCon 2004*, Singapore 2004, nr 1.
14. Zieliński P., *Cyfrowe Przetwarzanie Sygnałów*, Warszawa 2005, WKŁ.
15. UCPTE, „*Summary of the Current Operating Principles of the UCPTE*”, Oct. 28, 1998.

ABSTRACT

Since digital audio recordings have appeared, audio authentication became more difficult and in most cases impossible. Currently available technologies and free editing software allow the forger to cut or paste any single word without audible artifacts. Nowadays the most frequently used solution is the Electric Network Frequency (ENF) detection method. This paper describes the problem of tampering detection and discusses the main method used for authenticity analysis of digital audio recordings based on ENF criterion. This approach is based on random fluctuations of the 50 Hz or 60 Hz frequency emitted by the electric network and induced in electronic circuits of recording devices. The assumption of the method is a relatively high correlation of electric frequency changes within the areas connected to the same network grid. As an example of a practical application of the method three general ways of obtaining ENF are described: spectrogram analysis, frequency measurement and zero-crossing method. According to the frequency measurement method two algorithms are described and exemplary plots are presented with interpretation.