

Wiktor OLCHOWIK

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Optimalizacja ilości danych w pomiarach charakterystyk częstotliwościowych

Dr inż. Wiktor OLCHOWIK



Absolwent i pracownik WAT od 1985r. W działalności naukowej i badawczej zajmuje się zautomatyzowanymi systemami pomiarowymi i diagnostycznymi. Autor oprogramowania systemów diagnostycznych nagrodzonych złotym i srebrnym medalem na Międzynarodowej Wystawie INNOWACJE. Aktualnie zatrudniony w Wyższej szkole Technologii Informatycznych w Warszawie, gdzie pełni także funkcję dziekana Wydziału Informatyki, oraz w Wojskowej Akademii Technicznej jako adiunkt.

e-mail: wiktur.olchowik@wat.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono metody ograniczenia ilości danych podczas zautomatyzowanego pomiaru charakterystyk częstotliwościowych układów elektronicznych poprzez optymalizację rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości oraz grupowanie i uśrednianie wyników w ramach ustalonych przedziałów. Efektem przedstawionej metodyki jest redukcja danych pomiarowych i udokładnienie charakterystyk w obszarach o podwyższonej niepewności.

Słowa kluczowe: charakterystyka częstotliwościowa, optymalizacja rozdzielczości, kompresja danych.

Optimization of the amount of data in measurements of frequency characteristic

Abstract

In this paper, there are presented two methods limiting the amount of data during an automated measurement of the frequency response characteristics of linear electric circuits. The first method involves the optimization of the resolution in the frequency domain. It consists in the usage of a changeable frequency of measurements dependent on the gradient of the characteristics of the measured circuit. The frequency of measurements is automatically regulated so that the absolute difference between the values of the subsequent measurements is approximately constant. The second method involves the reduction of data in the areas with the increased measurement uncertainty, with the standard method of increasing the number of measurements. The method requires division of the frequency range with the increased measurement number into intervals, grouping and averaging the data in these intervals. The aforementioned techniques can be applied in parallel, integrating them into a single system. The result of the described integrated methodology is the decrease in the number of measurement data files and frequently decrease in the overall experiment time without significant decrease in the quality of the frequency characteristics reconstruction. Depending on the assumed quality and characteristic of the measurement, the amount of data can be reduced two to ten times. Moreover, the accuracy of the characteristic areas with the increased measurement uncertainty can be increased with the averaging method without the increase in the number of the data. The presented methodology can be implemented in computer measurement systems.

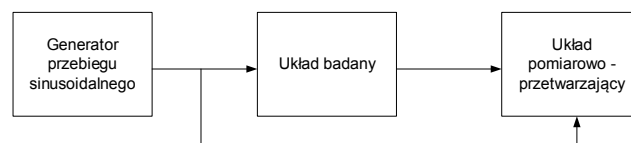
Keywords: frequency characteristic, optimization of the resolution, data compression.

1. Wstęp

Procesy pomiarowe często generują duże ilości danych. Pomimo znacznego wzrostu zasobów pamięci we współczesnych komputerach powoduje to ograniczenie liczby zarejestrowanych plików lub wzrost kosztów sprzętu. Rozwiązaniem może być stosowanie metodyki umożliwiającej minimalizację ilości danych pomiarowych bez istotnej straty informacji.

Pomiar charakterystyk częstotliwościowych liniowych układów elektronicznych najczęściej polega na wielokrotnym pomiarze

wzmocnienia i przesunięcia fazowego w określonym zakresie częstotliwości [1]. Najprostsza wersja stanowiska laboratoryjnego przedstawiona jest na rys. 1.

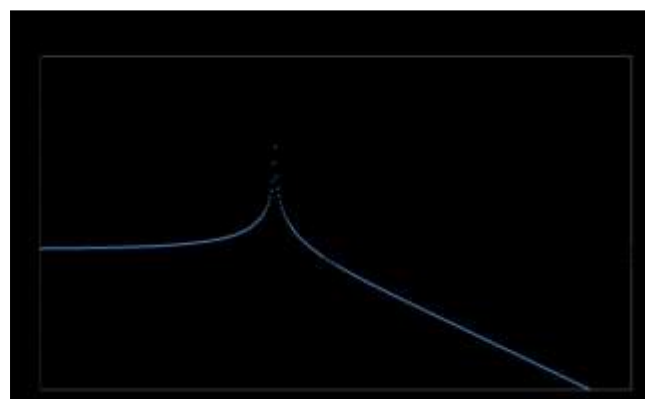


Rys. 1. Stanowisko do pomiaru charakterystyk częstotliwościowych
Fig. 1. The position for measuring frequency characteristics

Podstawowe możliwości ograniczenia ilości danych to zmniejszenia liczby wykonanych pomiarów, co związane jest z optymalizacją rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości, oraz zastosowanie pewnych form kompresji danych pomiarowych.

2. Optymalizacja rozdzielczości

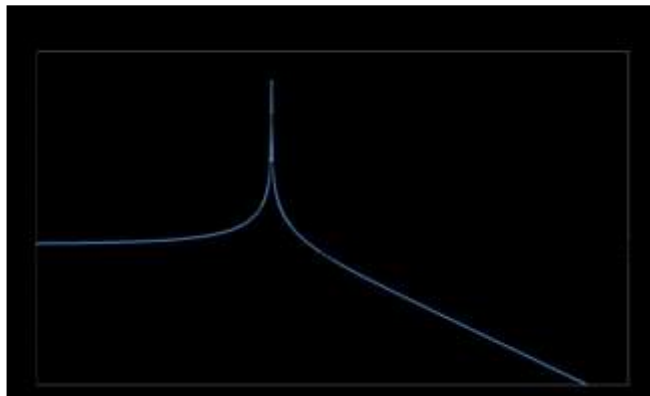
Uzyskanie dobrej dokładności odtworzenia charakterystyki wymaga relatywnie dużej ilości pomiarów na jednostkę częstotliwości. Przy czym równomierny rozkład punktów pomiarowych często nie jest optymalnym rozwiązaniem. Aby uzyskać podobną dokładność, ilość pomiarów powinna być większa w obszarach dużej zmienności charakterystyki. Przykładowy rozkład punktów pomiarowych dla logarytmicznej charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej $M(f)$ zarejestrowanej ze stałą rozdzielczością obrazuje (rys. 2), oraz zarejestrowanej z rozdzielczością zależną od szybkości zmian funkcji (rys. 3).



Rys. 2. Logarytmiczna charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa zarejestrowane ze stałą rozdzielczością
Fig. 2. Logarithmic amplitude-frequency characteristic measured with a constant resolution

Można zauważyć, że w przypadku stałej rozdzielczości dokładność odwzorowania niektórych fragmentów badanej charakterystyki jest niska. Teoretycznie można zastosować stałą, wysoką rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości, ale spowoduje to znaczące zwiększenie czasu pomiaru oraz zasobów potrzebnych do zapamiętania danych. Optymalnym rozwiązaniem jest więc zastosowanie zmiennej rozdzielczości uzależnionej od gradientu zmian charakterystyk badanego układu. Przy czym należy pamiętać, że synchronicznie z charakterystyką amplitudowo – częstotliwościową $A(f)$ na ogół rejestruje się także charakterystykę fazowo-częstotliwościową $\varphi(f)$ a dodatkowo jeszcze można rozpatrywać część rzeczywistą $P(f)$ i urojoną $Q(f)$. Ponieważ dynamika zmian

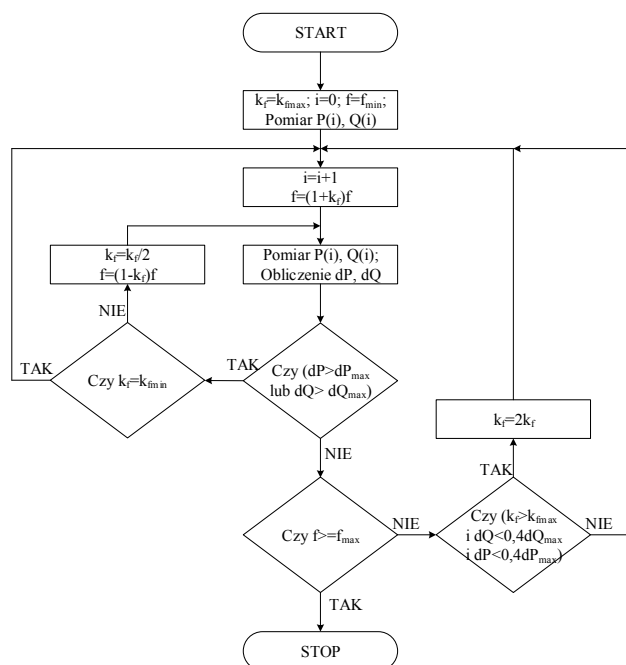
par charakterystyk $A(f), \varphi(f)$ oraz $P(f), Q(f)$ jest ze sobą powiązana, to wystarczy analiza tylko jednej pary charakterystyk.



Rys. 3. Logarytmiczna charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa zarejestrowane ze zmienną rozdzielczością

Fig. 3. Logarithmic amplitude-frequency characteristic measured with a varying resolution

Przykładowy algorytm realizujący powyższe założenia przedstawia rys. 4. Do analizy przyjęto $P(f)$ i $Q(f)$ z uwagi na podobną reprezentację liczbową.



Rys. 4. Algorytm optymalizujący rozdzielczość pomiarów w dziedzinie częstotliwości

Fig. 4. The algorithm of resolution optimization in the frequency domain

gdzie:

- i – kolejny numer pomiaru;
- f – częstotliwość bieżącego, i -tego pomiaru;
- f_{min} – najniższa częstotliwość badanego pasma
- f_{max} – najwyższa częstotliwość badanego pasma
- k_f – mnożnik częstotliwości pomiędzy kolejnymi pomiarami;
- k_{fmax} – największa założona wartość współczynnika k_f ;
- k_{fmin} – najmniejsza założona wartość współczynnika k_f ;
- $P(i)$ – wartość części rzeczywistej dla i -tego pomiaru;
- $Q(i)$ – wartość części urojonej dla i -tego pomiaru;
- dP – bezwzględna zmiana części rzeczywistej;
- dQ – bezwzględna zmiana części urojonej;
- dP_{max} – maksymalna dopuszczalna wartość dP ;
- dQ_{max} – maksymalna dopuszczalna wartość dQ ;

Problemem przy ustaleniu rozdzielczości pomiarów na osi częstotliwości df jest na ogół a priori niezny gradient zmienności charakterystyk. Rozwiązaniem może więc być sprawdzanie bezwzględnych wartości różnic wyników pomiędzy kolejnymi punktami pomiarowymi (dP i dQ) określanych zgodnie ze wzorem (1) i (2).

$$dP = |P(i) - P(i - 1)| \quad (1)$$

$$dQ = |Q(i) - Q(i - 1)| \quad (2)$$

Jeśli bezwzględne zmiany mierzonych wielkości przekraczają założoną dopuszczalną wartość ($dP > dP_{max}$ i $dQ > dQ_{max}$), to należy w pętli zwiększać rozdzielczość aż do uzyskania wymaganej dokładności. Ponieważ w celu zapewnienia równomiernego rozłożenia pomiarów w logarytmicznej skali kolejna częstotliwość f_i jest obliczana na podstawie poprzedniej f_{i-1} według wzoru (3), to regulacja rozdzielczości odbywa się poprzez zmianę współczynnika mnożnika k_f .

$$f_i = (1 + k_f)f_{i-1} \quad (3)$$

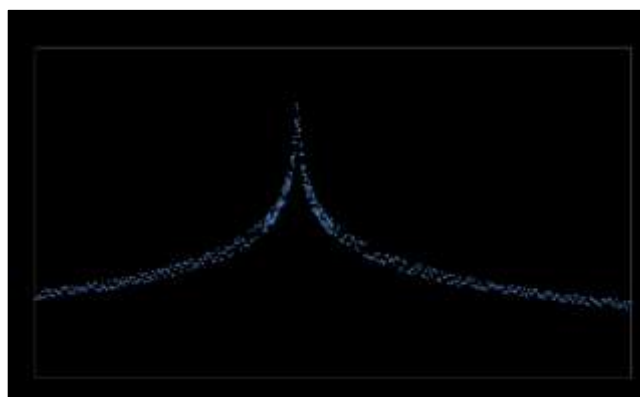
Dodatkowym kryterium zakończenia pętli powinien być warunek maksymalnej rozdzielczości (maksymalnej liczby pomiarów na jednostkę częstotliwości), który wprost odzwierciedlony jest w relacji współczynnika mnożnika częstotliwości $k_f > k_{fmin}$. Wartość k_{fmin} nie powinien być mniejszy od względnej niepewności pomiaru częstotliwości.

Natomiast w przypadku, gdy $dP < 0,4dP_{max}$ i $dQ < 0,4dQ_{max}$ algorytm przewiduje zwiększenie odstepu w dziedzinie częstotliwości df w celu zmniejszenia liczby pomiarów. Teoretycznie zwiększenie k_f mogłoby nastąpić już przy spełnieniu warunków $dP < 0,5dP_{max}$ i $dQ < 0,5dQ_{max}$, ale współczynnik 0,4 powoduje powstanie swoistej pętli histerezy i umożliwia uniknięcie częstych "przeskoków" k_f .

Efekt działania zaproponowanego algorytmu jest automatyczna regulacja gęstości pomiarów w sposób zapewniający ich minimalną liczbę oraz równomierną dokładność w całym zakresie badanych częstotliwości.

3. Kompresja danych pomiarowych

Powyżej opisany algorytm predestynowany jest do stosowania w zautomatyzowanych systemach pomiarowych z możliwością dokładnego sterowania generatorem i zakłada wykonanie pojedynczego pomiaru dla ustalonych częstotliwości w kolejności narastającej. Otrzymana charakterystyka może jednak nie być wystarczająco równomierna w przypadku zbyt dużej niepewności pomiaru jej parametrów. Przykład ilustruje rys. 5.

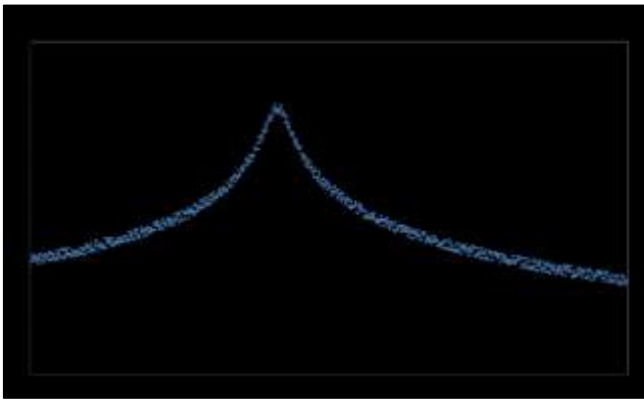


Rys. 5. Charakterystyka pomierzona w warunkach zwiększonej niepewności pomiaru

Fig. 5. Characteristic measured at increased uncertainty

Powodów powstawania obszarów charakterystyki o podwyższonej niepewności jest dużo, a przykładem może być np. bardzo duże wzmocnienie lub tłumienie układu. Wówczas jeden z sygnałów ma bardzo małą amplitudę i wpływ szumów jest znaczący. Powoduje to większą niepewność pomiaru amplitudy sygnału a szczególnie przesunięcia fazowego [2]. W efekcie wzrasta niepewność pomiaru parametrów wszystkich charakterystyk częstotliwościowych.

W takim przypadku rozrzut wartości dla poszczególnych punktów pomiarowych na charakterystyce otrzymanej z pomiarów może powodować, że jest ona niedokładna i mało przydatna w praktyce. W celu uzyskania charakterystyki zbliżonej do idealnej oczekiwanej można zastosować różne metody wygładzania. Jednak w świetle teorii pomiarów lepszą metodą jest zmniejszenie niepewności poprzez zwielokrotnienie ilości pomiarów. W praktyce można wielokrotnie powtarzać pomiary w zakresie częstotliwości, dla których rozrzut wartości charakterystyki jest zbyt duży. Jednak proste zwiększenie liczby pomiarów nie spowoduje efektu wygładzenia przebiegu charakterystyki, co obrazuje rys. 6.



Rys. 6. Charakterystyka pomierzona w warunkach zwiększonej niepewności przy zwielokrotnionej liczbie pomiarów.

Fig. 6. Characteristic measured at increased uncertainty with the increased number of measurements

Warunkiem uzyskania efektu redukcji niepewności musi być uśrednianie wyników pomiarów dla identycznych częstotliwości. Jednak w praktycznie realizowanych seriach pomiarów powtarzające się częstotliwości na ogół nie występują, tym bardziej, że pomiar częstotliwości też jest obarczony niepewnością. Uśrednianie można więc przeprowadzić tylko dla zbliżonych częstotliwości z pewnego zakresu. Można to osiągnąć poprzez podzielenie badanego zakresu częstotliwości na regularne przedziały i grupowaniu pomiarów w ramach ustalonych przedziałów.

Przy podziale badanego pasma częstotliwości należy uwzględnić kilka czynników determinujących szerokość przedziałów:

- Wielkość przedziałów musi być stała w skali logarytmicznej, co wymusi identyczną liczbę przedziałów na dekadę. Wygodne w praktyce są liczby typu 10^n , $2 \cdot 10^n$, $5 \cdot 10^n$.
- W celu uzyskania dużej rozdzielczości charakterystyki w dziedzinie częstotliwości szerokość przedziałów powinna być jak najmniejsza.
- Zastosowanie przedziałów mniejszych niż niepewność pomiaru częstotliwości nie ma uzasadnienia merytorycznego.
- Minimalna szerokość przedziałów może wynikać z żądanej rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości, wynikającej z innych przesłanek (technicznych, organizacyjnych, prawnych).
- Mniejsza szerokość powoduje zwiększenie liczby przedziałów w badanym zakresie częstotliwości a co za tym idzie także zwiększenie ilości danych pomiarowych.

Oprócz ustalenia zasad podziału badanego pasma częstotliwości na przedziały należy także określić parametry charakterystyki uśredniane w ramach pojedynczego, j -tego przedziału. Jak przedstawiono w rozdziale 2 może to być para $A(j), \varphi(j)$ lub $P(j), Q(j)$. Wygodniejsza wydaje się para wielkości $P(j), Q(j)$ ponieważ uśrednianie $\varphi(j)$ wymagałoby kontroli i ewentualnej redukcji kąta

przesunięcia fazowego. Dodatkowo konieczne jest rejestrowanie liczby pomiarów $N(j)$ dla j -tego przedziału częstotliwości. Wynika to ze wzorów (4) i (5) obliczających wartość uśrednioną.

$$P'(j) = \frac{(N(j)-1)P(j) + P_N(j)}{N(j)} \quad (4)$$

$$Q'(j) = \frac{(N(j)-1)Q(j) + Q_N(j)}{N(j)} \quad (5)$$

gdzie:

j – numer przedziału częstotliwości

$N(j)$ – liczba pomiarów w j -tym przedziale;

$P(j)$ – uśredniona część rzeczywista dla $N-1$ pomiarów w j -tym przedziale;

$P'(j)$ – uśredniona część rzeczywista dla N pomiarów w j -tym przedziale;

$P_N(j)$ – część rzeczywista dla N -tego pomiaru w j -tym przedziale;

$Q(j)$ – uśredniona część urojona dla $N-1$ pomiarów w j -tym przedziale;

$Q'(j)$ – uśredniona część urojona dla N pomiarów w j -tym przedziale;

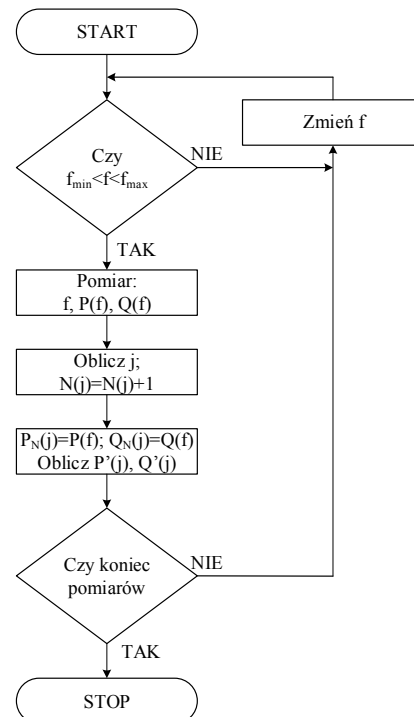
$Q_N(j)$ – część urojona dla N -tego pomiaru w j -tym przedziale;

Wzory (4) i (5) są postacią rekurencyjną zależności, które można przedstawić w postaci wzorów (6) i (7) typowych do obliczania wartości średnich [3].

$$P'(j) = \frac{\sum_{k=1}^N P_{k(j)}}{N(j)} \quad (6)$$

$$Q'(j) = \frac{\sum_{k=1}^N Q_{k(j)}}{N(j)} \quad (7)$$

Przykładowy algorytm umożliwiający uśrednianie wartości w ramach ustalonych przedziałów przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Algorytm pomiarów z przedziałowym uśrednianiem
Fig. 7. The algorithm of interval averaging measurements

Pierwszym krokiem jest wykonanie pomiarów częstotliwości f , wzmocnienia $A(f)$ i przesunięcia fazowego $\varphi(f)$ oraz obliczenie parametrów charakterystyki w postaci $P(f)$ i $Q(f)$. Następnie po sprawdzeniu warunku $f_{\min} < f < f_{\max}$ należy określić indeks przedzia-

łu częstotliwości j według wzoru (8) zaokrąglając w dół do liczby całkowitej.

$$j = \lfloor L \log_{10}(f - f_{min}) \rfloor \quad (8)$$

gdzie:

j – indeks przedziału częstotliwości;
 f – częstotliwość pomierzona;
 f_{min} – dolny próg badanego zakresu częstotliwości;
 L – liczba przedziałów na dekadę;

W j -tym przedziale zwiększa się o jeden licznik pomiarów N i oblicza się nowe, uśrednione wartości $P'(j)$ i $Q'(j)$ według wzorów (4) i (5). W celu udokładnienia informacji pomiarowej dodatkowo można rejestrować wartość częstotliwości $f'(j)$ obliczaną według wzoru (9).

$$f'(j) = \frac{(N(j)-1)f(j) + f_N(j)}{N(j)} \quad (9)$$

Wartości $P(j)$ i $Q(j)$ będą tym lepszymi estymatorami wartości rzeczywistych im większa będzie wartość $N(j)$, ponieważ analogicznie jak przy serii pomiarów podlegającej rozkładowi normalnemu niepewność maleje wprost proporcjonalnie do pierwiastka z liczby pomiarów [3].

Proces można powtarzać w danym zakresie częstotliwości aż do uzyskania oczekiwanej jednostajności charakterystyki, przy czym kryteria zakończenia takiego cyklu pomiarowego mogą być różnie sformułowane. Przykładowo może to być osiągnięcie założonego błędu regresji. Często istotnym kryterium jest także maksymalny czas lub liczba pomiarów.

Kompresja danych polega na grupowaniu pomiarów dla zbliżonych częstotliwości i zastępowaniu $N(j)$ rekordów tylko jednym rekordem danych przy minimalnych stratach informacji.

4. Zintegrowana metodyka pomiaru charakterystyk częstotliwościowych

Powyżej przedstawione, teoretycznie ze sobą niezwiązane metody można zastosować współbieżnie integrując w jedną spójną całość. W kompleksowym ujęciu można przedstawić to w postaci 4 podstawowych kroków:

- Ustalenie założeń wstępnych do eksperymentu pomiarowego: zakresu częstotliwości badanych f_{min} , f_{max} , współczynników mnożnika częstotliwości k_{min} , k_{max} , maksymalnych bezwzględnych zmian rejestrowanych parametrów charakterystyki dP_{max} , dQ_{max} , liczby przedziałów na dekadę L , i innych np. maksymalną wartość błędu regresji.
- Wykonać serię pomiarów zgodnie z algorytmem optymalizującym rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości przedstawionym na rys.3.
- Na obszarach charakterystyki, dla których nie jest spełniony warunek jednostajności, wykonać dodatkową serię pomiarów z maksymalną rozdzielczością.
- Punkt c) powtarza się aż do spełnienia kryterium lub wyczerpania limitu powtórzeń.

Powyższa metodyka umożliwia znaczące zmniejszenie ilości danych pomiarowych. Przykładową analizę porównawczą przeprowadzono przy założeniach:

- Zakres częstotliwości obejmuje 5 dekad.
- Minimalna dopuszczalna rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości jest równa 100 pomiarów na dekadę a dla zakresu nie przekraczającego 10% badanego pasma wymagana rozdzielczość osiąga 1000.
- Dla jednej dekady w dziedzinie częstotliwości występuje średnio np. 5-krotnie podwyższona niepewność pomiaru param-

trów charakterystyki co wymaga 25-krotnego zwielokrotnienia pomiarów.

- Dla pojedynczego pomiaru standardowo rejestrowane są 3 a dla opisanej metodyki 4 wartości w postaci zmiennej „int” lub „float”, czyli 4-bajtowej.

Ponadto dla standardowego eksperymentu założono stałą, maksymalną rozdzielczość w całym zakresie częstotliwości, 25-krotne powtórzenie pomiarów dla pasma o podwyższonej niepewności i zarejestrowanie w pamięci wszystkich danych. Dla 4 dekad otrzymujemy więc 4 000 pomiarów plus dla dekady o podwyższonej niepewności 25 000 co daje łącznie 29 000 zarejestrowanych pomiarów. Przy 12 bajtach potrzebnych do zapamiętania danych z pojedynczego pomiaru otrzymujemy 348 000 bajtów. Można więc przyjąć, że charakterystyka zostanie zapisana w pliku o wielkość około 350 kB.

Natomiast dla eksperymentu z zastosowaniem opracowanej metodyki założono, że większość charakterystyki zostanie pomierzona z minimalną rozdzielczością, a rozdzielczość maksymalna wystąpi dla 10% pasma + zakres o podwyższonej niepewności. Zwielokrotnione pomiary nie zwiększają ilości zarejestrowanych danych ponieważ są uśredniane dla tych samych przedziałów. Dla 3,9 dekady po 100 plus 1,1 dekady po 1000 otrzymujemy łącznie 1490 pomiarów. Do zapamiętania danych z pojedynczego pomiaru potrzeba 16 bajtów więc daje to w sumie 23 840 bajtów czyli około 24 kB.

Jak wykazano na powyższym przykładzie można osiągnąć nawet 10-krotną redukcję ilości danych. Kwestią dyskusyjną jest, czy wielkość plików z danymi pomiarowymi ma istotne znaczenia przy obecnym poziomie technologii i w związku z tym możliwościami rejestracji i archiwizacji olbrzymich ilości danych. Najbardziej wyrazistym przypadkiem wskazującym na zyski wynikające z optymalizacji jest transmisja plików pomiarowych na odległość. W pozostałych sytuacjach obiektywnie jest kryterium ekonomiczne, czy większy jest koszt implementacji metody, czy oszczędności wynikające z jej wdrożenia.

5. Podsumowanie

Efektom powyższej zintegrowanej metodyki jest:

- Minimum koniecznej liczby pomiarów, przy rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości wynikającej z przebiegu charakterystyki i założonej dokładności jej rejestracji.
 - Udokładnienie charakterystyki w obszarach o podwyższonej niepewności metodą uśredniania wyników bez zwiększania ilości danych pomiarowych.
 - Zmniejszenie plików z danymi pomiarowymi a często także czasu wykonania eksperymentu bez istotnego pogorszenia jakości odtwarzania charakterystyki częstotliwościowej.
- Dodatkowym warunkiem minimalizacji plików z danymi pomiarowymi jest, aby rejestrowane były rekordy tylko tych przedziałów, dla których wykonany został co najmniej jeden pomiar.

Powyżej przedstawiona metodyka jest predestynowana do implementowania w zautomatyzowanych systemach pomiarowych.

6. Literatura

- Sedáček M., Titěra M.: Interpolations in frequency and time domains for distorted and noisy harmonic signals. *Measurement*, (35) s. 97-107, 7-2004
- Olchowski W, Figoń P.: Analiza metod pomiaru przesunięcia fazowego. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 11-2013, ISSN: 0043-5112, str. 18-21.
- Cieciura M, Zacharski J.: *Metody probabilistyczne w ujęciu praktycznym*. Vizja Press&IT 2007.