



## Problemy wyznaczania transmitancji w rozległych systemach z autonomicznie pracującymi obserwatorami sygnałów

PIOTR FIGOŃ<sup>1</sup>, ZBIGNIEW STAROSZCZYK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych,  
00 908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, pfigon@wat.edu.pl

<sup>2</sup>Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej  
i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75,  
Zbigniew.Staroszczyk@ee.pw.edu.pl

**Streszczenie.** W artykule na przykładzie symulowanej rozległej sieci elektroenergetycznej zaproponowano i zweryfikowano metody umożliwiające wyznaczenie transmitancji widmowych dostarczających informacji o relacjach pomiędzy pobudzeniem i odpowiedzią obserwowanymi w różnych, odległych węzłach sieci. Problem dotyczy przetwarzania i relacjonowania sygnałów rejestrowanych niezależnie (różne częstotliwości próbkowania, różne charakterystyki amplitudowo-fazowe torów kondycjonowania), co generuje konieczność ich resamplingu oraz wprowadzenia mechanizmów synchronizacji czasowej.

**Słowa kluczowe:** transmitancja widmowa, resampling, obserwacje niezależne, system rozległy, sieć elektroenergetyczna

DOI: 10.5604/12345865.1131489

### 1. Wstęp

W pracy przedstawiono problemy wyznaczania transmitancji widmowej w paśmie częstotliwości akustycznych poprzez analizę sygnałów pobudzenia i odpowiedzi obserwowanych i rejestrowanych w różnych węzłach rozległej, symulowanej sieci elektroenergetycznej. W praktyce elektroenergetycznej, obserwacje związane z różnymi, często oddalonymi terytorialnie węzłami prowadzone są z użyciem autonomicznych torów rejestracji sygnałów różniących się parametrami użytkowymi (częstotliwość próbkowania, poziom szumów) oraz charakterystykami amplitudowo-fazowymi

przetworników pierwotnych i układów kondycjonowania sygnałów. Dodatkowo w rekordach rejestrowanych niezależnie nie istnieje wspólny punkt referencyjny czasu ściśle związany z niepewnością wyznaczenia charakterystyki fazowej transmitancji widmowej.

W kontekście elektroenergetycznym problem referowania rekordów czasowych pojawia się między innymi przy obserwacjach wielowęzłowych, rozległych systemów elektroenergetycznych, m.in. w celu przeciwdziałania awariom powstałym na skutek błędów obsługi czy nieprawidłowych nastaw kluczowych elementów podsystemu przesyłowego [1]. Źródłem informacji o parametrach systemu są w tym przypadku fazory napięć i prądów [2, 3] wyliczane na podstawie sygnałów rejestrowanych w różnych punktach systemu. Ze względu na kluczową rolę relacji fazowych pomiędzy węzłami sieci niezbędny jest pomiar kąta z dokładnościami nie gorszymi niż  $0,1^\circ$ , co wymaga generowania znaczników czasowych o dokładności  $1 \mu\text{s}$  zapewnianej przez system nawigacji satelitarnej. Taka dokładność jest wystarczająca z punktu widzenia problematyki poruszanej w referacie i nastawionej m.in. na estymację argumentu transmitancji widmowych w paśmie częstotliwości akustycznych, a więc kilkaset razy wyższym niż ma to miejsce w klasycznych zastosowaniach elektroenergetycznych nastawionych na przesyłanie energii elektrycznej.

Wszystko to stwarza szereg problemów sposobu wykorzystania dostępnych rekordów i metod cyfrowego przetwarzania sygnałów (CPS) do wyznaczenia prawidłowej postaci transmitancji międzywęzłowych.

Na te ogólne zagadnienia związane ze stroną praktyczną estymacji transmitancji widmowej z wykorzystaniem niezależnych obserwatorów nakłada się specyfika sieci elektroenergetycznej oraz generowanych przez nią sygnałów, co w realnej implementacji czyni przedstawione zadanie relatywnie trudnym. W przyjętym modelu numerycznym sieci uwzględniono dwie zasadnicze cechy realnego obiektu, mianowicie nieliniowość sieci związaną z załączaniem obciążeń kluczowanych (energoelektronicznych) oraz występowanie komponentów harmonicznych addytywnych w stosunku do składowej podstawowej ( $230 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ ).

Artykuł zorientowany jest na problemy ogólne związane z poprawnym relacjonowaniem względem siebie rekordów pochodzących z obserwacji niezależnych, a nie na problemy typowo elektroenergetyczne. Mimo to omawiane testy finalne dotyczą transmitancji widmowych obserwowanych w symulowanym obiekcie elektroenergetycznym, możliwych do wyznaczenia na drodze numerycznej, co umożliwiła uzyskanie odniesienia do uzyskanych wyników.

## 2. Wprowadzenie

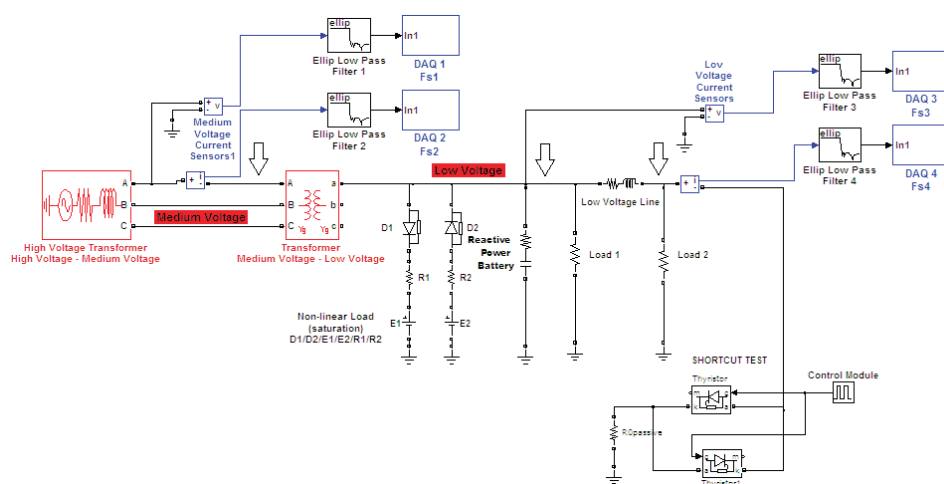
Orientacja pracy na przykładowym obiekcie badań, jakim jest sieć elektroenergetyczna, dotyczy stosunkowo trudnego przypadku obiektu aktywnego generującego

przebiegi charakteryzujące się lekką niestacjonarnością i szumami. Aktywność związana jest z występowaniem w ich widmie częstotliwościowym silnej składowej podstawowej o nominalnej częstotliwości 50 Hz, wartości skutecznej 230 V i komponentów harmonicznyc.

Problem minimalizowania wpływu aktywności systemu oraz szumów na wynikową estymatę transmitancji rozwiązano, stosując algorytm dyskretnego przekształcenia Fouriera (DPF) i zaawansowane przetwarzanie zespolonego widma wynikowego z wykorzystaniem metody czasowej i częstotliwościowej. Metody te użyte będą w finalnych testach do przetwarzania sygnałów pochodzących z symulowanego obiektu i zostaną omówione jedynie pobieżnie z uwagi na ich bogatą prezentację w publikacjach Autorów [4, 5].

Ideą metody częstotliwościowej jest realizacja pobudzenia i prowadzenie analiz w punktach osi częstotliwościowej zapewniających małą niepewność wyznaczania zespolonej funkcji docelowej. Przy przyjętym założeniu wolnej zmienności tej funkcji przy zmianach częstotliwości przeprowadzana jest interpolacja z wykorzystaniem węzłów skojarzonych z małą niepewnością pomiaru i wyznaczenie (aktualizacja) wartości międzywęzłowych. Warunkiem stosowania tej metody jest uzyskanie dużej w porównaniu z metodą czasową rozdzielczości widmowej analiz rzędu kilku herców [4].

W metodzie czasowej pojedyncza obserwacja uzyskiwana jest na drodze kilkakrotnie powtarzanego eksperymentu, wykorzystującego dwa stany pracy sieci — stan naturalny oraz stan zaburzenia, skojarzone z zakresem czasowym odpowiadającym kolejnym dwóm okresom składowej podstawowej. W celu ograniczenia wpływu aktywności systemu na estymatę wynikową obliczany jest sygnał różnicowy poddawany dalszemu przetwarzaniu [5].



Rys. 1. Schemat symulowanej sieci elektroenergetycznej

Obydwie metody z uwagi na różne podejścia do eliminacji wpływu aktywności systemu mogą różnić się jakością uzyskanego wyniku. Ich wykorzystanie jest bezproblemowe w warunkach lokalnego próbkowania sygnałów przy zapewnieniu synchronizacji czasowej rekordów i próbkowaniu koherentnym, co ma miejsce przy korzystaniu z wielokanałowych kart DAQ (*data acquisition*) z opcją równoczesnego próbkowania (*simultaneous sampling*).

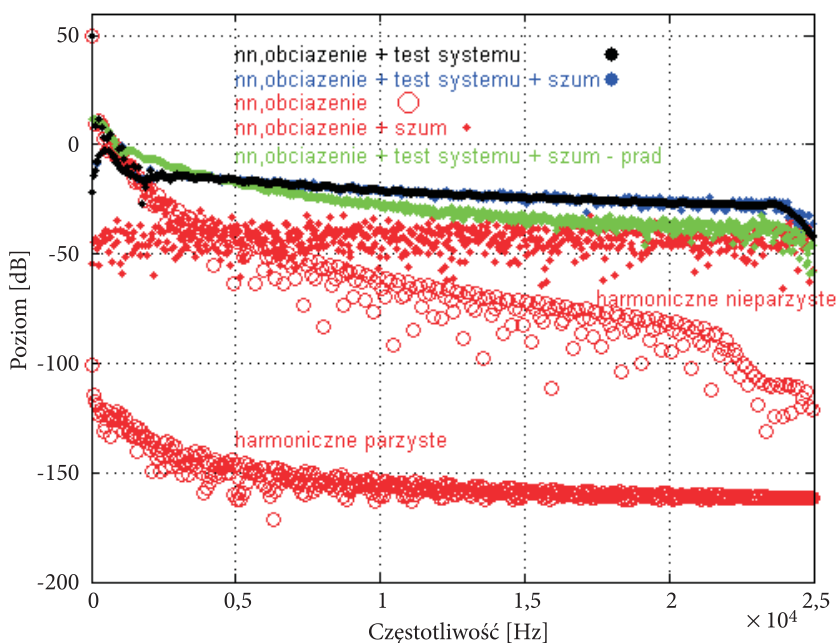
Niniejsza praca zorientowana jest na wypracowanie z rekordów zbieranych niezależnie nowych przetworzonych rekordów o właściwościach rekordów zbieranych lokalnie (próbkowanie koherentne, bez lub z co najwyżej kontrolowanym, znanym i możliwym do skorygowania przesunięciem czasowym). Rekordy takie mogą być przetwarzane z użyciem znanych i sprawdzonych metod.

### 3. Obiekt badań

Badania symulacyjne zrealizowano na bazie modelu sieci elektroenergetycznej z dostępnymi zaciskami transformatora po stronie średniego (SN) i niskiego napięcia (nn). Obciążenie transformatora stanowiła sekcja kompensacji mocy biernej 10 kVA współdzieląca węzeł zasilający z obciążeniem o rezystancji  $1 \Omega$ . Do tego samego węzła przyłączono dwójnik RL modelujący linię zasilającą obciążoną rezystancją  $5 \Omega$ . Dodatkowo obciążenie bezpośrednie transformatora stanowił prostownik diodowy załączający rezystancję  $1 \Omega$  w otoczeniu wartości minimalnej i maksymalnej przebiegu napięcia zasilającego. Specyfika pracy tego obciążenia nieliniowego była przyczyną odkształcenia przebiegu napięcia w stopniu porównywalnym do występującego w sieci rzeczywistej.

Podczas gdy obciążenie w postaci prostownika diodowego wprowadzało harmoniczne uznawane za naturalne i skojarzone z pracą typowego układu odbiorczego, to drugi układ nieliniowy dołączony do skrajnego węzła symulowanej sieci nastawiony jest na identyfikację jej modelu częstotliwościowego. Generuje on silno-prądowe pobudzenie o szerokim paśmie częstotliwości. Związana z gwałtownymi zmianami wartości chwilowej prądu odpowiedź napięciowa, również o szerokim paśmie, przenosi się od węzła obserwacji na inne odległe węzły badanego systemu, nie wyłączając strony średnionapięciowej. Na rysunku 2 pokazano widma częstotliwościowe sygnałów prądu i napięć związanych z naturalnym obciążeniem systemu oraz ze stanem zaburzenia we wskazanych strzałkami na rysunku 1 węzłach sieci. Każdy z przebiegów czasowych poddanych analizie widmowej został dodatkowo wzbogacony o szum o poziomie obserwowanym w sieci realnej, co ma zorientować Czytelnika we wpływie zakłóceń na maksymalne pasmo obserwacji transmitancji opisującej tutaj zależność prąd–napięcie, a więc mającej charakter impedancji.

Uwagę zwraca wykreślona za pomocą czerwonych okręgów krzywa, w szczególności jej niskopoziomowy zakres ( $-150$  dB) opisany jako „harmoniczne parzyste”. Z uwagi



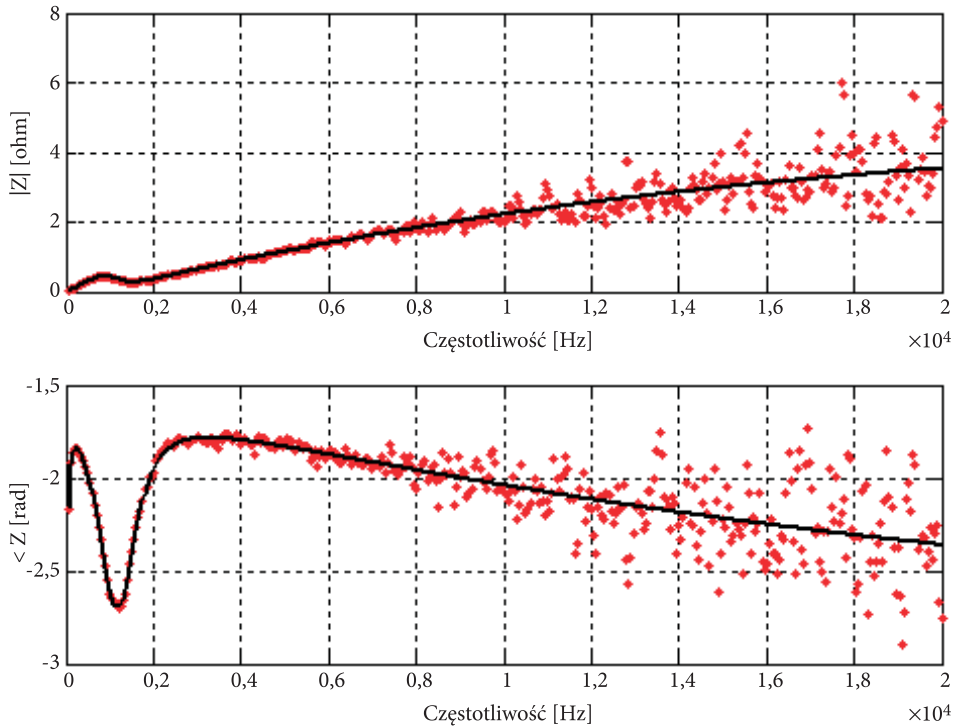
Rys. 2. Widma amplitudowe częstotliwościowe sygnałów napięcia strony wtórnej transformatora

na symetrię prądu obciążenia diodowego (załączanie każdej diody jeden raz w ciągu półokresu) występowanie harmonicznych parzystych jest wykluczone, co oznacza, że będące obiektem zainteresowania komponenty widmowe wynikają ze specyfiki pracy algorytmu całkowania równań różniczkowych [6] (*ordinary differential equations* — ode). Poziom ten wyznacza pewną granicę rozdzielczości amplitudowej widma sygnałów syntetycznych, których źródłem jest środowisko symulacyjne.

Po dodaniu do sygnału napięcia skojarzonego ze stanem obciążenia szumu o wariancji nawiązującej do praktyki pomiarowej uzyskano zmniejszenie dynamiki do poziomu 90 dB, co obrazuje krzywa wykreślona czerwonymi kropkami (oś rzędnych poziom około -50 dB). Widma amplitudowe wykreślone za pomocą kropek koloru czarnego (odpowiedź napięciowa na obciążenie naturalne i testujące) i niebieskiego (odpowiedź napięciowa na obciążenie naturalne i testujące + szum) lokują się powyżej poziomu -50 dB. Ich struktura determinowana jest głównie przez kształt prądu testującego (wąska szpilka powtarzana co 1,5 okresu). Identyfikacja modelu częstotliwościowego systemu jest w tym przypadku możliwa w paśmie częstotliwości sięgającym do 18-20 kHz, co związane jest również ze strukturą widmową prądu testującego wykreślona za pomocą zielonych kropek. Widmo tego prądu zbliża się do krytycznego poziomu -50 dB w okolicach częstotliwości 17-18 kHz.

Opisywany w podpunkcie przypadek dotyczy rekordów zbieranych lokalnie przy zapewnieniu synchronizacji czasowej i przy tej samej częstotliwości próbkowania

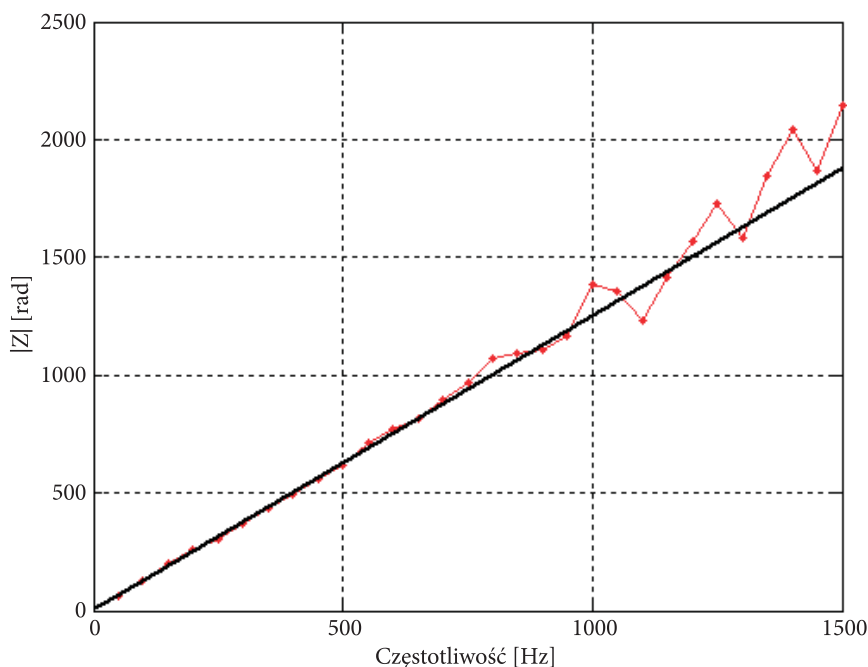
(standard DAQ). Wyniki otrzymane w oparciu o tego typu eksperyment zaprezentowano na rysunku 3. Dotyczą one zależności prądowo-napięciowych występujących w symulowanym węźle mają więc charakter impedancji jednoznacznie opisywanej przez moduł i fazę.



Rys. 3. Moduł (sekcja górna) i faza (sekcja dolna) transmitancji prądowo-napięciowej testowanego węzła. Obserwacja lokalna

Dostępność zacisków strony pierwotnej i wtórnej transformatora SN/nn umożliwia obserwację sygnałów występujących po stronie średniego i niskiego napięcia, a co za tym idzie badanie zależności (prąd–napięcie, prąd–prąd itp.) pomiędzy różnymi węzłami systemu. Na rysunku 4 przedstawiono na tle referencji (czarna linia) wynik identyfikacji impedancji sieci SN widzianej z zacisków strony pierwotnej transformatora.

Stosunkowo wąskie pasmo częstotliwościowe prezentacji (1500 Hz) wynika z chęci ukazania zakresu częstotliwościowego, w którym niepewność pomiaru mieściła się w granicach umożliwiających w miarę komfortową obserwację wizualną wykresu. Przyczyną rosnącej niepewności poza tym pasmem jest zmniejszanie SNR harmonicznym występujących w sygnałach intensywniejsze przy wzroście ich częstotliwości.



Rys. 4. Moduł impedancji widzianej z zacisków transformatora od strony średniego napięcia

Wspólną cechą sygnałów wykorzystywanych w tym rozdziale (rys. 2-4) jest ich współbieżne, synchroniczne próbkowanie. Oznacza to jednoczesne próbkowanie dwóch kanałów (np. prądu i napięcia) przy braku przesunięcia czasowego i z tą samą częstotliwością. Dla takiego przypadku wyznaczenie transmitancji jest relatywnie proste. Prezentowane wyniki stanowią referencję do wyników uzyskanych z przetwarzania rekordów związanych z obserwacjami odległymi, na co zorientowana jest niniejsza publikacja. Przy obserwacjach prowadzonych niezależnie sytuacja jest bardziej złożona i wymaga dodatkowego przetwarzania wstępnego (*resampling*) oraz końcowego (korekta argumentu transmitancji widmowej).

## 4. Problemy

Przetwarzanie niezależnie rejestrowanych rekordów w celu wypracowania transmitancji widmowych stwarza trzy następujące problemy:

1. Problem numerycznego wyznaczania transmitancji z rekordów o różnej liczbie próbek, skojarzonych z innymi częstotliwościami próbkowania.
2. Problem referencji czasowej wymagającej wprowadzenia znaczników czasu globalnego do obydwu rejestrowanych rekordów.



3. Problem eliminacji (kompensacji) rozbieżności charakterystyk amplitudowo-fazowych analogowych torów przenoszenia sygnałów (nieomawiane w referacie, będące przedmiotem innego referatu).

## 5. Resampling sygnałów

Niezależne rejestracje prowadzone z wykorzystaniem różnych częstotliwości próbkowania dostarczają opisu widmowego sygnałów w różnych punktach osi częstotliwości. Widma takie nie dają się skorelować w celu wyznaczenia transmitancji, a stosowanie procedur interpolacyjnych w dziedzinie częstotliwości jest trudne.

Łatwiejszym rozwiązaniem proponowanym przez autorów jest przetwarzanie sygnałów w dziedzinie czasu mające na celu uzyskanie koherentnych<sup>1</sup> rekordów w dwóch kanałach obserwacyjnych. Jeden z kanałów można potraktować jako referencyjny, w drugim należy wówczas zastosować resampling, co doprowadzi do uzyskania wspomnianej koherencji. Resampling, zwłaszcza w warunkach potrzeby zachowania szerokiego pasma obserwacji przy dobrej jakości sygnałów, wymaga zastosowania przemyślanych algorytmów [7], ale nie stanowi sam w sobie problemu merytorycznego. Po zmianie częstotliwości próbkowania jednego z rekordów sygnały z obydwu kanałów: pobudzenia i odpowiedzi stają się koherentne — mają tę samą częstotliwość próbkowania. Jako takie mogą być bezpośrednio wykorzystane do wyznaczenia transmitancji — wymagają jedynie zsynchronizowania w czasie.

Testy jakości procedur resamplingu zrealizowano dla up-samplingu (interpolacja cyfrowa) i down-samplingu (decymacja cyfrowa), wykorzystując standardowy resampler dostępny w pakiecie Matlab.

Źródłem sygnału analogowego był symulowany generator dostępny w pakiecie Simulink. Wytwarzał on przebieg składający się z trzech komponentów sinusoidalnych.

1. Komponent 1 — częstotliwość 511,23 Hz, amplituda 1 V,
2. Komponent 2 — częstotliwość 3000 Hz, amplituda 1 V,
3. Komponent 3 — częstotliwość 4000 Hz, amplituda 0,02 V.

Sygnał z generatora próbkowano z wykorzystaniem częstotliwości 51,2 kHz oraz 10 kHz. Częstotliwość komponentu trzeciego dobrano tak, aby lokował się w górnym obszarze pasma obserwacji sygnału dla niższej z używanych częstotliwości próbkowania.

Przeprowadzono następujące przetwarzanie, a następnie analizę sygnałów:

1. Ciąg skojarzony z wyższą częstotliwością próbkowania decymowano z 51,2 na 10 kHz, a następnie porównano z przebiegiem pierwotnym otrzymanym

<sup>1</sup> Koherencja oznacza tutaj wspólną częstotliwość próbkowania, jest standardem w wielokanałowym przetwarzaniu sygnałów przez karty DAQ.

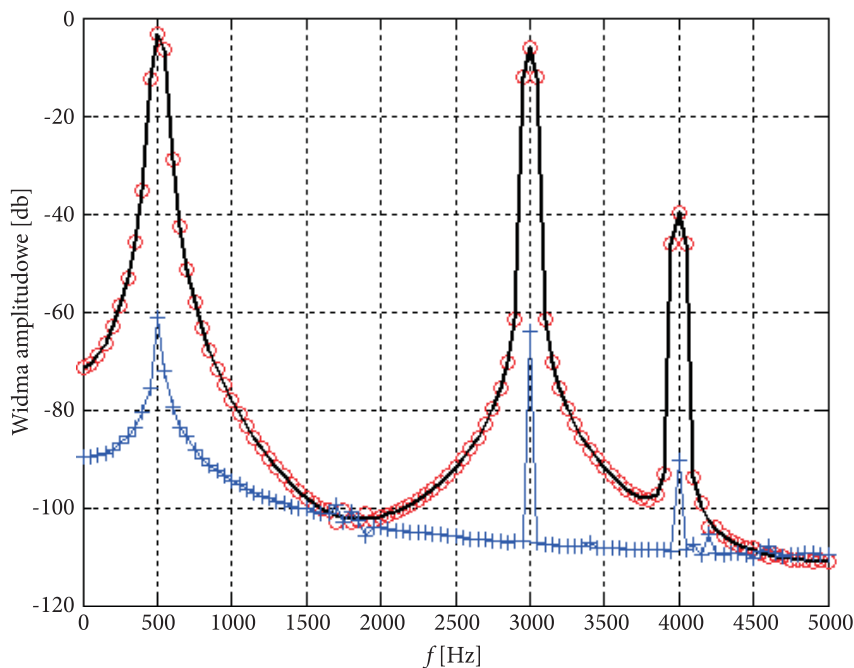


w wyniku próbkowania sygnału analogowego z częstotliwością 10 kHz (*down-sampling*).

2. Ciąg skojarzony z niższą częstotliwością interpolowano z 10 na 51,2 kHz i porównano z przebiegiem otrzymanym w wyniku próbkowania sygnału z generatora analogowego z częstotliwością 51,2 kHz (*up-sampling*).
3. Porównanie sygnału referencyjnego z sygnałem otrzymanym w wyniku przetwarzania i analizy widma sygnału różnicowego.

Wyniki analiz właściwości upsamplingu przedstawiono na rysunku 5. Pobieżna obserwacja widm amplitudowych nie pozwala dostrzec wielu detali — generalnie widma pokrywają się ze sobą, w całym paśmie obserwowany jest przesłuch od komponentu o najniższej częstotliwości. Dopiero widmo sygnału różnicowego pozwala ocenić jakość zastosowanego algorytmu interpolacyjnego. Odstęp pomiędzy prążkami widma sygnału użytecznego a prążkami widma sygnału różnicowego jest bliski 60 dB dla częstotliwości najniższej i środkowej oraz 50 dB dla częstotliwości 4000 Hz. Algorytm radzi sobie więc dość dobrze z sygnałami rejestrowanymi w reżimie kilku próbek na okres.

Prezentowane wyniki świadczą o małych błędach wprowadzanych przez stosowaną metodę oraz o doskonałej synchronizacji rekordów sygnałów (pierwotnego



Rys. 5. Widma amplitudowe przebiegu oryginalnego o częstotliwości 10 kHz (linia czarna ciągła), przebiegu 51,2 kHz po decymacji (czerwone okręgi) oraz sygnału różnicowego (niebieskie krzyżyki połączone czarną linią)

i odtworzonego) związanych z ich przetwarzaniem z początkiem ustawionym na wspólnej próbce startowej.

Przypadek zilustrowany na rysunku 5 dotyczy upsamplingu sygnału, tzn. zwiększania liczby próbek analizowanego ciągu. Podobne właściwości widmowe ma sygnał po downsamplingu — niemal identyczny rysunek ilustrujący błędy (jak rysunek 5) nie został zamieszczony z braku miejsca.

Zaprezentowane wyniki dotyczą relatywnie trudnego przypadku znacznie różniących się częstotliwości próbkowania. Mimo tak znaczących różnic jakość wypracowanego sygnału na nowej częstotliwości próbkowania jest w pełni zadowalająca w paśmie sięgającym 80% pasma, którego górną granicę stanowi częstotliwość Shannona. Pozwala to ocenić i zaakceptować jakość algorytmu dostępnego w popularnym środowisku symulacyjnym.

Klasyczny resampling opisany powyżej doprowadza do uzyskania koherentnie próbkowanych rekordów, ale nie rozwiązuje problemu ich referencji czasowej (patrz kolejny rozdział).

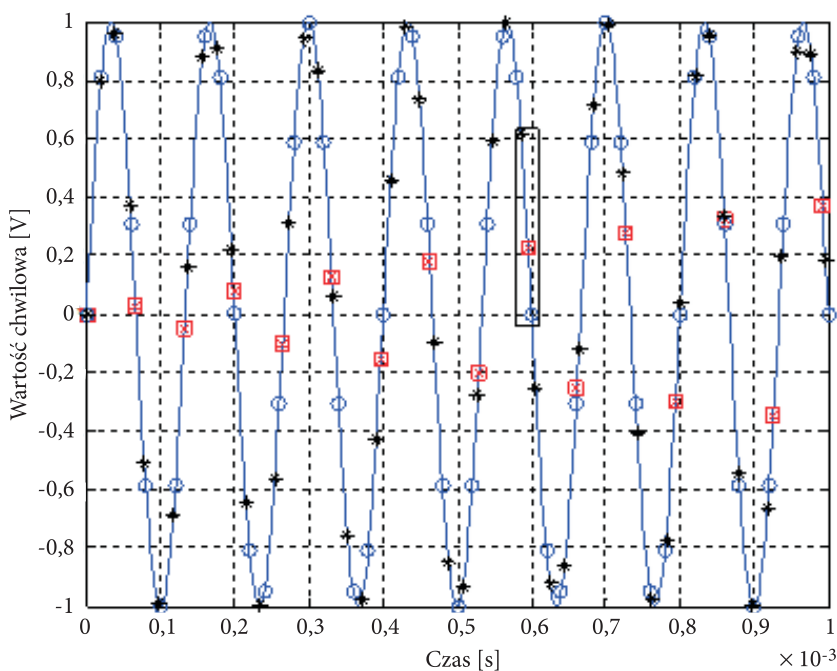
## 6. Referencja czasowa

Prowadzenie odległych rejestracji sygnałów o czasie obserwacji rzędu sekund wymaga uruchomienia zasobów sprzętowych pracujących z dokładnością subsekundową, co jest problemem inżynierskim i samo w sobie nie jest związane z przetwarzaniem sygnałów, a więc nie będzie tutaj omawiane. Drugim problemem jest wprowadzenie znaczników czasowych do rejestrowanych sygnałów i ich wykorzystanie zgodnie z treścią rysunku 6 i jego omówieniem.

W przypadku niezależnych torów obserwacji każdy nieskorygowany pomiar transmitancji widmowej obarczony jest błędem czasowej synchronizacji rekordów, który objawia się poprzez liniowo narastający z częstotliwością błąd fazy. Przyczyną tego błędu jest dyskretny krok przyrostu czasu i efekt noniuszowy przy synchronizowaniu czasowym rekordów metodą przesunięć, w którym jako próbki startowe wybiera się przyległe do siebie elementy z rekordów próbkowanych z różną częstotliwością.

Problem ilustruje rysunek 6, w którym przebieg sinusoidalny o częstotliwości 7500 Hz próbkowano z częstotliwościami 15,123, 50 oraz 51,2 kHz.

Z uwagi na odmierzanie czasu liczone od zera jedynie dla tej chwili próbkowania występuje pełna zgodność czasowa trzech rekordów. Dla większości próbek referencyjnych skojarzonych z najmniejszą częstotliwością próbkowania bezpośrednio odnoszenie ich do rekordów próbkowanych szybciej wprowadza losowy błąd czasu jak przedstawiony dla wyróżnionego fragmentu na rysunku 2:  $-0,09$  ms ( $-0,42$  rad) w stosunku do próbkowania 51,2 kHz i  $+0,05$  ms ( $0,24$  rad) dla próbkowania 50 kHz. Ten losowy błąd czasu przenosi się na liniowy błąd fazy — jest on dość znaczący



Rys. 6. Przykład sygnału próbkowanego z wykorzystaniem trzech różnych częstotliwości próbkowania — problem referencji czasowej

(ułamek radiana dla sygnału o częstotliwości 7500 Hz) i powinien być kompensowany — kompensacja wymaga wprowadzenia znacznie precyzyjniejszych (niż okres próbkowania) znaczników czasu do referowanych rekordów i dokonania korekt metodą czasową (interpolacja) lub widmową (liniowa korekta argumentu wyznaczonej transmitancji widmowej).

Kompensacja błędu, o którym mowa powyżej, wymaga znajomości czasu rozsunęcia próbek wybranych jako startowe. Czas ten łatwo określić dla dowolnie ustawionej chwili startowej, dysponując jednym precyzyjnie ustalonym punktem referencji czasu w obydwu rekordach, takim jak np. punkt początkowy rysunku 6. Można sobie łatwo wyobrazić wytworzenie takiej referencji przez układy sprzętowe pracujące podobnie do układów synchronizacji oscyloskopu cyfrowego, ale napędzane układami odmierzającymi globalny czas (jak np. czas GPS). W przypadku czasu GPS markerem może być impuls przemijania globalnej sekundy. Indeksy i pozycje czasowe pierwszych próbek pobranych po tymże markerze muszą być określone przez układy sprzętowe dokładnego pomiaru czasu zainstalowane w obydwu torach rejestracji sygnałów. Z ich wartości (indeks i pozycja w każdym z kanałów) wyznaczyć można relatywne przesunięcie czasowe rekordów i wybrać próbki startowe dla resamplingu opisanego w poprzednim rozdziale.

## 7. Wyniki badań

Z wykorzystaniem sygnałów, których źródłem była symulowana sieć elektroenergetyczna, przeprowadzono niezależne rejestracje sygnałów realizowane przy różnych częstotliwościach próbkowania. Dla pobudzenia ulokowanego po stronie niskonapięciowej (strzałka prawa na rysunku 1) obserwowano odpowiedź napięciową w innym węźle strony nn (strzałka środkowa) oraz prąd i napięcie w węźle strony SN (strzałka lewa). W eksperymencie niskonapięciowym wyznaczano impedancję systemu zasilającego przewód doprowadzający napięcie do laboratorium (dwójnik RL) jak relację napięcia jego lewej strony (strzałka środkowa) do prądu płynącego przez dwójnik (strzałka z prawej strony). Eksperyment związany ze stroną średniego napięcia dotyczył określenia transmitancji widmowej opisującej relacje prądowo-napięciowe związane z zaciskiem A transformatora, badanym parametrem była więc zastępcza impedancja widmowa widziana z tego miejsca (strzałka lewa) w stronę źródła zasilania.

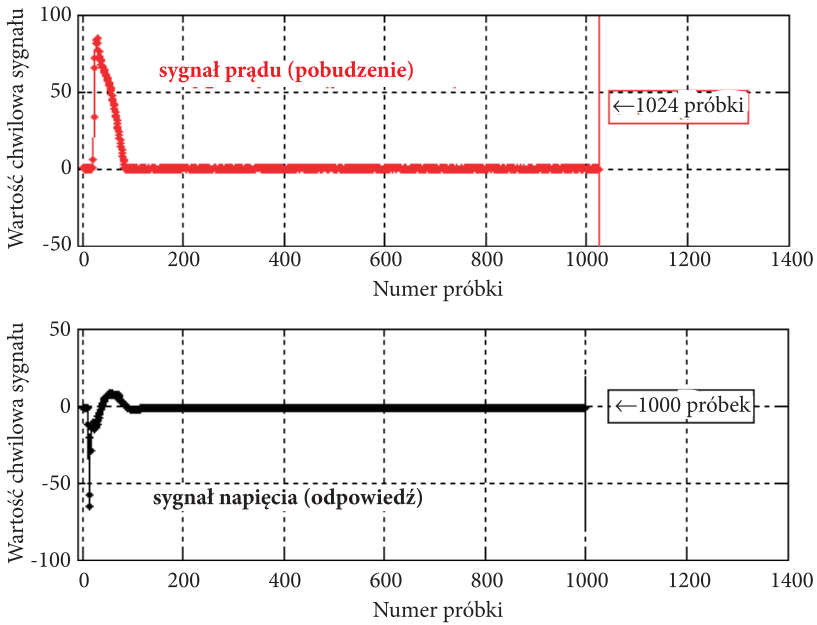
## 8. Obserwacja niskonapięciowa

W rozdziale zaprezentowano wyniki identyfikacji transmitancji widmowej opisującej relację prąd–napięcie obserwowane po stronie niskiego napięcia. Rejestrowane z częstotliwością 51,2 kHz pobudzenie prądowe zlokalizowane było na krańcu linii zasilającej RL. Odpowiedź napięciowa próbkowana z wykorzystaniem częstotliwości 50,0 kHz skojarzona była z drugim zaciskiem linii. Do przetwarzania otrzymanych danych wykorzystano metodę czasową.

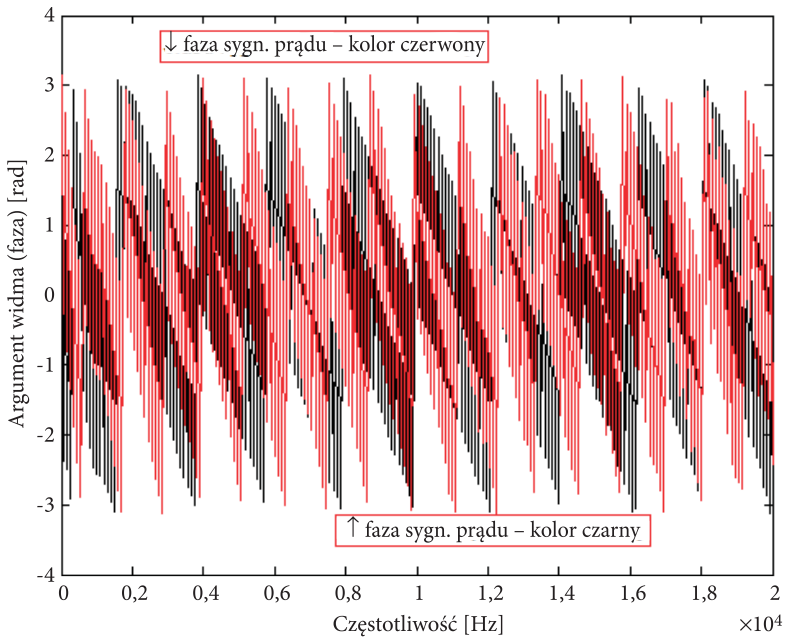
Wykreślone na rysunku 7 rekordy przedstawiają sygnał różnicowy (okres do okresu) prądu i napięcia dla obserwacji 20 ms zawierający różne ilości próbek. Po przejściu do dziedzinie częstotliwości uzyskiwane są dwa zespolone ciągi, których moduł i argument rozłożone są w innych punktach dyskretnej osi częstotliwości. Wykorzystanie takich danych do obliczenia modułu transmitancji widmowej przy założeniu wolnozmiennnej charakterystyki wynikowej jest możliwe z zastosowaniem prostych formuł interpolacyjnych i nie będzie tutaj omawiane z braku miejsca.

Znacznie większym problemem jest estymowanie kąta fazowego (argumentu transmitancji). Bezpośrednio wyznaczona faza DPF dla ciągów z rysunku 7 przedstawiona jest na rysunku 8. Przyjmuje ona różne trudne do bezpośredniego porównania kształty. Przetwarzanie tego typu „surowych” danych w dziedzinie częstotliwości jest możliwe, choć dość trudne.

Jak zostanie pokazane w dalszej części rozdziału, korzystanie z resamplingu w dziedzinie czasu pozwala uzyskać dobre wyniki wyznaczania fazy w znacznie w prostszy, klasyczny sposób.



Rys. 7. Rekordy uzyskane w oparciu o obserwację sygnałów skojarzonych z dwoma różnymi węzłami sieci z wykorzystaniem innych częstotliwości próbkowania

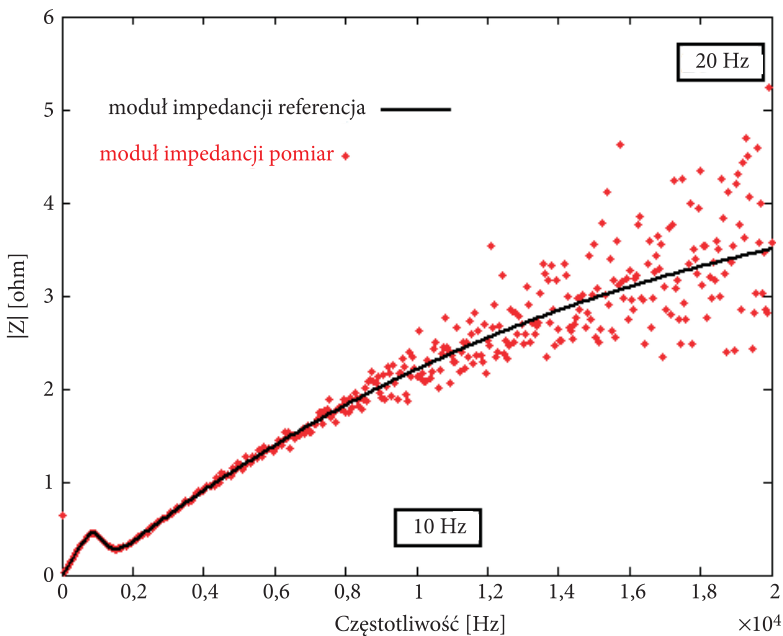


Rys. 8. Faza nieliniowo-fazowych sygnałów prądu i napięcia

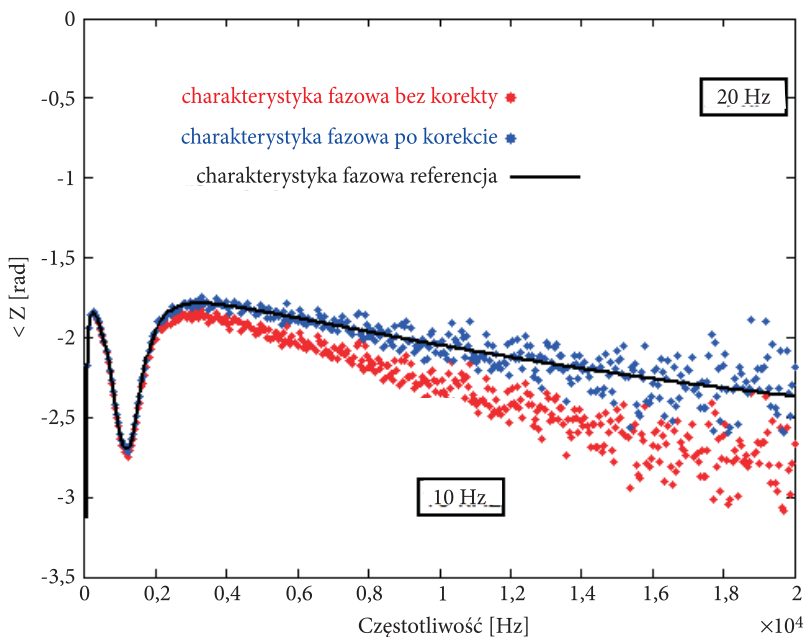
W celu uzyskania koherentnych z punktu widzenia częstotliwości próbkowania rekordów przeprowadzono interpolację cyfrową sygnału napięcia (rys. 7 — sekcja dolna), uzyskując dwa 1024 pkt. wektory koherentne sygnału prądu i napięcia, które na dalszym etapie poddano przetwarzaniu z wykorzystaniem metody czasowej. Uzyskano w ten sposób estymatę transmitancji widmowej opisującej relacje prądowo-napięciowe w węźle znajdującym się na lewym krańcu linii zasilającej (rys. 1). Moduł impedancji przedstawiono na rysunku 9 na tle referencji obwodowej, fazę na rysunku 10. Obserwowana niepewność estymaty wynikowej pochodzi z uwzględnienia w sygnałach pierwotnych (niekoherentnych, rys. 7) szumu pomiarowego o poziomie zbliżonym do obserwowanego w sieci rzeczywistej.

W charakterystyce częstotliwościowej przedstawiającej moduł impedancji obserwowana jest rosnąca z częstotliwością w stosunku do krzywej referencyjnej niepewność pomiaru. Porównanie rysunku 9 i rysunku 3 pozwala dostrzec, że rozrzut wartości modułu względem odniesienia jest na nich zbliżony, co dobrze świadczy o zastosowanej metodzie przetwarzania sygnałów.

W przypadku charakterystyk fazowych poza uwarunkowaniami związanymi z niepewnością wyznaczenia modułu pojawiają się aspekty związane z brakiem synchronizacji czasowej rekordów (problem omawiany i zilustrowany na rysunku 6). Odniesieniem dla charakterystyk fazowych wykreślonych kropkami jest referencja wykreślona czarną linią ciągłą (rys. 10). Wynik uzyskany w oparciu o przetwarzanie



Rys. 9. Moduł transmitancji widmowej na tle referencji numerycznej (obwodowej)



Rys. 10. Faza transmitancji przed korektą i po korekcie

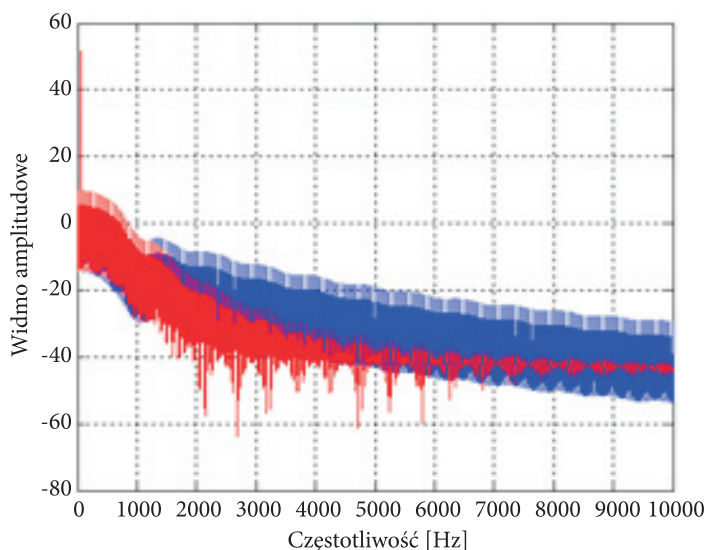
sygnałów koherentnych skojarzony jest z kolorem czerwonym. W odchyłce bezpośrednio wyznaczonej fazy od przebiegu prawidłowego (referencja) poza czynnikiem losowym obserwowany jest komponent liniowy związany błędem czasowej synchronizacji rekordów. Korekta takiego przesunięcia zrealizowana w oparciu o omawiany wcześniej dokładny wspólny marker czasowy rekordów możliwa jest w granicach określonych przez dokładność znakowania czasu (tu 1  $\mu$ s). Zastosowanie korekty doprowadza do uzyskania fazy narysowanej na niebiesko na rysunku 10, całkowicie zgodnej z fazą referencyjną. Obserwowany rozrzut wyników w porównaniu z rysunkiem 3 jest bardzo podobny. Świadczy to o pełnej przydatności metody resamplingu do wypracowywania prawidłowej postaci zespolonej transmitancji z rekordów danych zbieranych niezależnie z różnymi częstotliwościami próbkowania.

## 9. Obserwacja średnionapięciowa

Wyniki przedstawione w poprzednim rozdziale dotyczyły strony niskiego napięcia symulowanego obwodu.

W celu zilustrowania aspektów identyfikacji transmitancji skojarzonych z węzłami innymi niż te, do których przyłączony jest układ testujący, na rysunku 11 wykreślono widmo amplitudowe prądu obciążenia strony niskonapięciowej transformatora (linia koloru czerwonego) na tle widma prądu pobudzenia (linia koloru niebieskiego).

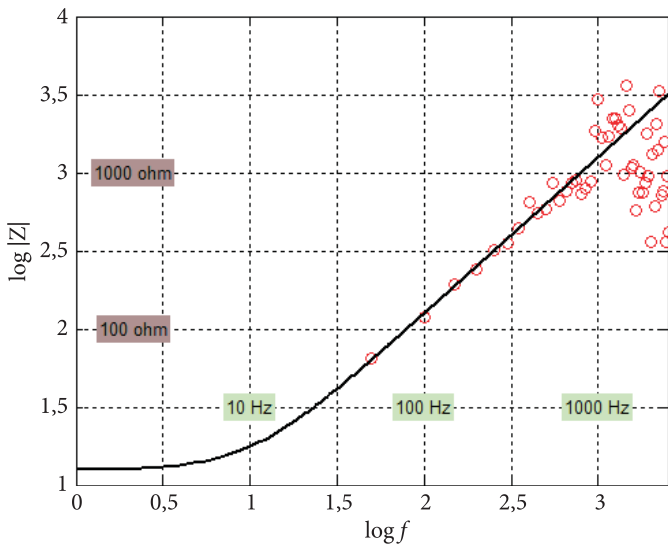




Rys. 11. Widma amplitudowe prądu obciążenia transformatora (linia koloru czerwonego) oraz prądu testującego (linia koloru niebieskiego) w paśmie 10 kHz

Rysunek ilustruje rozptył prądu testującego w sieci, którego znaczna część, zwłaszcza dla wyższych częstotliwości, przejmowana jest przez kondensatory kompensacji mocy biernej. Znaczna część harmonicznych jest „zwierana” przez pojemność, co objawia się w widmie prądu transformatora dość szybkim spadkiem poziomu harmonicznych szacowanym na około 15 dB/okt. Uznać można, że w paśmie powyżej 3000 Hz harmoniczne zanikają — z uwagi na przenoszenie prądu na stronę pierwotną przez transformator tłumaczy to brak możliwości wyznaczenia impedancji strony SN systemu powyżej częstotliwości 1 kHz (rys. 4 i 12).

Celem informacji przekazanych w poprzednim akapicie było ukazanie Czytelnikowi problemów związanych z obserwacją odległą skojarzoną dodatkowo z innymi poziomami napięć. Przeprowadzono identyfikację transmitancji widmowej widzianej z węzła, do którego przyłączone jest zasilanie strony pierwotnej transformatora. Warunki akwizycji sygnałów były identyczne jak opisane w poprzednim rozdziale, tzn. zastosowano obserwację z użyciem dwóch częstotliwości próbkowania. Na rysunku 12 zaprezentowano wypracowaną estymatę modułu impedancji. Zrezygnowano z prezentacji pasma powyżej 1500 Hz z uwagi na dużą niepewność wyniku związaną z przetwarzaniem zakresu częstotliwościowego o niewielkim poziomie sygnału użytecznego (mały SNR). W celu uwypuklenia detali związanych z pasmem obserwacji kilkuset Hz wykorzystano zobrazowanie logarytmiczne. Dobra jakość wyniku pozostaje dyskusyjna w porównaniu z realizacją eksperymentu bezpośredniego (rys. 9 i 10).



Rys. 12. Moduł transmitancji widmowej — identyfikacja parametrów strony średniego napięcia

## 10. Podsumowanie

W artykule przedstawiono kompleksowe podejście do wyznaczania transmitancji w rozległym obiekcie z prowadzonymi niezależnie obserwacjami sygnałów pobudzenia i odpowiedzi. Rozwiązano zasadnicze problemy korelowania niezależnych obserwacji w celu uzyskania wiarygodnej funkcji transmitancji wiążącej pobudzenie i odpowiedź w rozległym obiekcie. Orientacja na sieć elektroenergetyczną nadaje aspekt aplikacyjny prezentowanemu materiałowi i zaproponowanym w pracy metodom przetwarzania danych.

Prezentowane wyniki wykazują pełną przydatność metody resamplingu do wyznaczania transmitancji skrośnych w odległych węzłach testowanego systemu, przy obserwacjach sygnałów prowadzonych w różnych warunkach przez niezależnie pracujące tory rejestracji sygnałów.

Artykuł wpłynął do redakcji 1.07.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 15.07.2014 r.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na X Szkole — Konferencji „Metrologia Wspomagana Komputerowo — MWK'2014” Waplewo, 27-30 maja 2014.

### LITERATURA

- [1] VASSEL G.S., *Northeast Blackout of 1965*, Power Engineering Review, 11, 1991, 1.
- [2] MING Z., CENTENO V.A., THORP J.S., PHADKE A.G., *An Alternative for Including Phasor Measurements in State Estimators*, Power Systems, 21, 4, 2006, 1930-1937.

- [3] CHAKRABARTI S., KYRIAKIDES E., *PMU Measurement Uncertainty Considerations in WLS State Estimation*, Power Systems, 24 2, 2009, 1062-1071.
- [4] STAROSZCZYK Z., JOSKO A., *Real time power system linear model identification: instrumentation and algorithms*, Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2, 2000, 897-901.
- [5] STAROSZCZYK Z., *Power system nonstationarity and accurate power system identification procedures*, Harmonics and Quality of Power, 10th International Conference on, 1, 2002, 235-242.
- [6] OSOWSKI S., CICHOCKI A., SIWEK K., *MATLAB w zastosowaniu do obliczeń obwodowych i przetwarzania sygnałów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.
- [7] HARRIS E.J., *Multirate filters for interpolating and desampling San Diego*, Academic Press, 1987.

P. FIGOŃ, Z. STAROSZCZYK

**Determination of transfer function in large area system with remote independent signal observations**

**Abstract.** On the example of the simulated, large area power grid, the methods for the transfer function determination between distanced excitation/observation points have been proposed and verified. The discussed problem deals with processing of independently registered input and output signals (different sampling periods, different solutions of conditioning circuits) for which signal resampling and accurate time reference markers are required.

**Keywords:** transfer function, resampling, remote observations, large area systems, power grid