



## Poszerzanie pasma cyfrowych metod wyznaczania transmitancji — korekta błędów asymetrii torów obserwacji sygnałów

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

<sup>1</sup>Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75, zbigniew.staroszczyk@ee.pw.edu.pl

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

**Streszczenie.** W artykule zaproponowano rozwiązanie problemu eliminacji/ograniczenia wpływu transmitancji obwodów wejściowych na wyznaczane metodami cyfrowymi transmitancje w obserwowanym obiekcie. Metoda wykorzystuje widmową funkcję korekcyjną wypracowaną na etapie kalibracji w oparciu o pomiar referencyjny znanej transmitancji obiektu wzorowego. W szczególnych warunkach pomiar taki może być zastąpiony bezpośrednim wprowadzeniem danych kalibracyjnych. Zastosowanie korekt poszerza pasmo częstotliwościowe obserwacji obiektu.

**Słowa kluczowe:** transmitancja, poszerzanie pasma, korekcja błędów, błędy fazy

**DOI:** 10.5604/12345865.1131484

### 1. Wstęp

Przedmiotem artykułu jest sposób rozszerzania zakresu częstotliwościowego cyfrowych metod pomiaru transmitancji korzystających z analiz DPF sygnału pobudzenia i odpowiedzi badanego obiektu. Zaawansowane CPS (cyfrowe przetwarzanie sygnałów) pozwala, przy korzystaniu z analiz częstotliwościowych, skutecznie wykorzystywać silnie stłumione sygnały obiektowe spoza formalnie definiowanego 3 dB pasma pracy przetworników pierwotnych. Takie „pozapasmowe” sygnały pochodzą z nieoptymalizowanego zakresu częstotliwościowego pracy sensorów (i całych torów pomiarowych),

w których następują szybkie i nie zawsze udokumentowane zmiany transmitancji torów obserwacyjnych w funkcji częstotliwości, przenoszące się bezpośrednio na wyznaczone wielkości wynikowe. Podobne niekontrolowane zmiany transmitancji torów wprowadzane są przy wymianie przetworników pierwotnych, co zazwyczaj ma miejsce przy zmianach zakresu pomiarowego obserwowanych wielkości.

Sposoby korekty wpływu zmian transmitancji torów obserwacji i przetwarzania sygnałów wejściowych i wyjściowych na wyznaczone funkcje przejścia i analiza ich skuteczności są przedmiotem artykułu.

Rozważana implementacja testowa dla prezentowanych rozwiązań, na którą zorientowany jest artykuł, dotyczy pomiaru impedancji sieci elektroenergetycznej w warunkach naturalnych jej pracy, co stanowi przykład konkretnego problemu pomiarowego. Pomiar jest inwazyjny i polega na analizie odpowiedzi napięciowej na impulsowe pobudzenie prądowe wprowadzane do testowanego węzła sieci.

Zakres częstotliwościowy, w którym wyznaczana jest wiarygodna (z użytkowego punktu widzenia) informacja o impedancji, związany jest z właściwościami obiektu (tu sieć elektroenergetyczna), torów kondycjonowania sygnałów prądu i napięcia, charakterystykami częstotliwościowymi pobudzenia oraz szumami i zakłóceniami obecnymi w pracującym systemie elektroenergetycznym. Problem poszerzenia pasma obserwacji dotyczy korekcji błędów systematycznych wypracowywania zespolonej wartości impedancji w funkcji częstotliwości.

Zaproponowane metody pozwalają w znacznym stopniu uniezależnić pomiar impedancji od parametrów sond wykorzystywanych do obserwacji prądu i napięcia, co ma bardzo istotne znaczenie użytkowe.

## 2. Stan badań

Problem symetrii torów kondycjonowania sygnałów jest ważny przy analizach dwu- i więcej kanałowych, w których relacjonowane są mniej lub bardziej niezależnie obserwowane sygnały.

Klasyczny problem współbieżności obserwacji sygnałów w najprostszym wydaniu pojawia się w rutynowym wielokanałowym przetwarzaniu A/C z wykorzystaniem pojedynczego przetwornika i rozwiązywany jest przez sprzętową realizację równoczesnego próbkowania (*simultaneous sampling*). W najbardziej skrajnym przypadku współbieżność dotyczy całkowicie niezależnie prowadzonych obserwacji (dwóch lub więcej) różnych wielkości fizycznych, w odległych węzłach rozległego obiektu, przy korzystaniu z różnych przetworników pierwotnych (np. prądu i napięcia) i różnych rejestratorów sygnałów (bez i z filtrem antyaliasingowym, o różnych pasmach obserwacji sygnałów i różnych częstotliwościach i momentach próbkowania)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Przypadek ten jest przedmiotem innego artykułu Autorów (...)

Z praktycznego punktu widzenia najbardziej istotnym źródłem niesymetrii obserwacji są tory analogowe, stosowane w nich sensory i układy kondycjonujące oraz filtry antyaliasingowe.

Problematyka korekt właściwości częstotliwościowych torów analogowych kondycjonowania sygnałów omawiana jest w publikacjach począwszy od lat 90. W pracy [1] przedstawiono problem i zaproponowano jego rozwiązanie. W kolejnych pracach [2, 3] dyskutowana jest cyfrowa metoda korekcji błędów wnoszonych przez filtr antyaliasingowy w jednokanałowym torze obserwacji sygnału. Po raz pierwszy podobne podejście zostało wykorzystane w elektroenergetyce do korekcji błędów wprowadzanych przez przetworniki pomiarowe w [4]. Liczne kolejne publikacje poświęcone tej samej tematyce [5, 6] wynikają bezpośrednio z potrzeb praktycznych związanych z rutynowo stosowaną wymianą sond prądowych i napięciowych używanych w praktyce eksploatacyjnej sieci ee. Należy zaznaczyć, że większość omawianych prac zorientowana jest na korektę właściwości częstotliwościowych jednokanałowego toru obserwacji sygnału w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem cyfrowego filtra korygującego, co stwarza problem jego zaprojektowania i implementacji. Podobne rozwiązanie, tym razem w technice analogowej, przedstawiono w [7].

Podejście do problemu w ujęciu dwukanałowym (omawiane tutaj) upraszcza problem, sprowadzając go do potrzeby zsymetryzowania właściwości częstotliwościowych torów, a niekoniecznie ich fizycznych rozwiązań. Oznacza to, że funkcja korekcyjna (jedna, wspólna dla dwóch torów) stosowana jest w dziedzinie widmowej do korekty transmitancji wynikowej, co nie stwarza potrzeby i problemu fizycznej realizacji filtra korygującego w każdym z kanałów.

Najprostsze obejście problemu asymetrii charakterystyk przetworników pierwotnych polega na znacznym, celowym zawężeniu pasma obserwacji w stosunku do pasma pracy przetworników, co czyni je wówczas funkcjonalnie podobnymi. Metoda ta została wykorzystana przez Autorów do konstrukcji referencyjnego toru rejestracji sygnałów prądu i napięcia w paśmie do 10 kHz o bardzo dobrych parametrach dokładnościowych [8]. Wadą takiego rozwiązania jest niepełne wykorzystanie możliwości obserwacyjnych torów i zawężone pasmo wyznaczania transmitancji.

W artykule zaproponowano rozwiązanie w pełni wykorzystujące możliwości układów obserwacji sygnałów, w których korygowane są błędy przez nie wnoszone w szerokim paśmie częstotliwości. Pozwala to w prosty i tani sposób znacznie rozszerzyć zakres częstotliwościowy prawidłowo wyznaczonej transmitancji (tu impedancji).

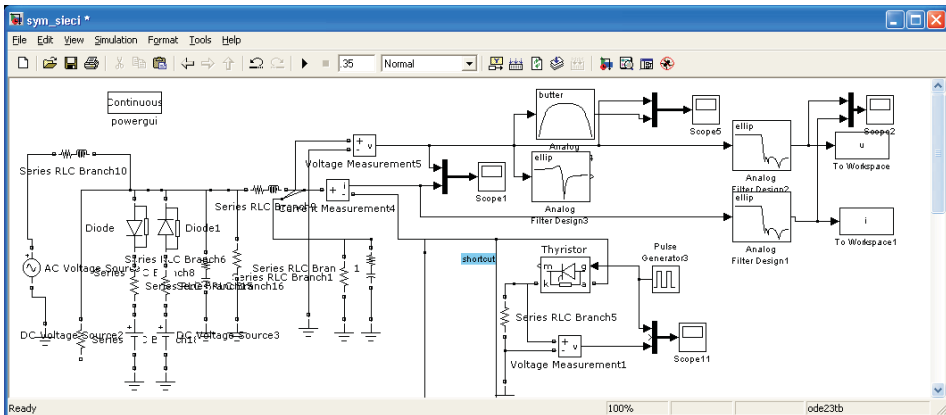
### 3. Przedmiot badań

Przyjęto założenie o lokalnej obserwacji obiektu, w którym pobudzenie i odpowiedź obserwowane są w tym samym fizycznym miejscu obiektu, co pozwala korzystać z dwukanałowego symetrycznego toru przetwarzania a/c sygnałów pobudzenia

i odpowiedzi. Założenie takie dotyczy większości obserwacji prowadzonych przy korzystaniu z wielokanałowych kart DAQ. Symetryczne torry pozwalają bezproblemowo wyznaczać transmitancje, nawet w warunkach znacznych, ale współbieżnych zmian charakterystyki przenoszenia torów obserwacyjnych<sup>2</sup>.

Na schemacie symulowanego obiektu (rys. 1) warunki symetrii spełnione są w przypadku jednakowej konstrukcji filtrów antyaliasingowych w kanałach obserwacji prądu i napięcia. Stąd referencyjna obserwacja obiektu realizowana jest dla prezentowanego na rysunku 1 połączenia, w którym sygnały prądu i napięcia PCC z przetworników pierwotnych przepuszczane są przez jednakowe filtry antyaliasingowe (tu eliptyczne dolnopasmowe, 8 st, 17,5 kHz, 0,2/60 dB). Tor taki oddaje właściwości realnego układu obserwacji sygnałów prądu i napięcia przedstawionego w [10].

Wtrącenie w jeden z torów dodatkowego filtra (*ellip, butter* na rysunku 1) psuje tę symetrię i stanowi odpowiednik wymiany sond pomiarowych w torze prądowym i/lub napięciowym.

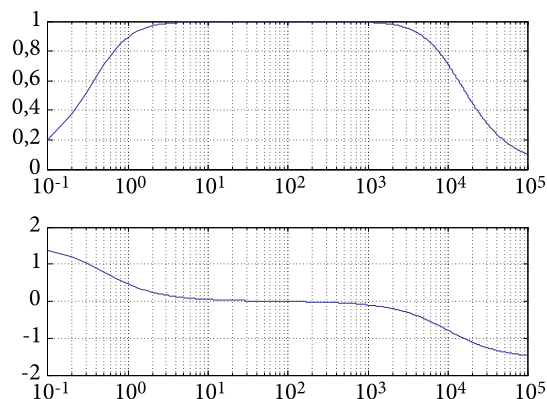


Rys. 1. Struktura symulowanej sieci elektroenergetycznej nn

Namiastką takiej wymiany sond w symulowanym obiekcie jest wtrącenie transmitancji przekładnika napięcia (*butter*) w tor napięciowy. Transmitancję przekładnika zaprojektowano jako pasmowo-przepustowy filtr Butterwortha rzędu 1 (stąd nazwa *butter*), dobierając parametry projektowe tak, by odpowiadały one obiektowi realnemu [9]. Jej właściwości przedstawia rysunek 2. Charakterystyki częstotliwościowe tej transmitancji, jak łatwo sprawdzić, dokładnie odpowiadają parametrom przetwornika omawianego w literaturze [9, 10], stanowiąc tym samym odpowiednik

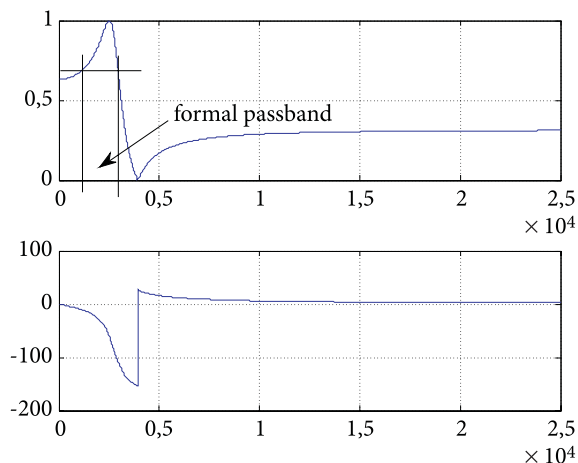
<sup>2</sup> Przy braku właściwości równoczesnego próbkowania (*ss* — *simultaneous sampling*) należy dodatkowo kompensować (zazwyczaj znane) opóźnienie międzykanałowe, wprowadzające liniowy błąd fazy wyznaczonej transmitancji.

realnego modułu pomiarowego stosowanego w sieciach SN. Podobne parametry mają inne przetworniki prądu i napięcia stosowane w praktyce [11, 12, 13, 14].



Rys. 2. Transmitancja filtra/przekładnika napięcia SN/nn [3]

Poszerzenie pasma zaszygalizowane w tytule artykułu związane jest z niskim rzędem transmitancji zastępczej przetwornika, dla której w zasadzie nie istnieje jednoznaczny punkt przejścia z pasma przepuszczania do pasma zaporowego (zazwyczaj bardzo arbitralnie jako pasmo pracy przetwornika podaje się pasmo 3 dB). Metody cyfrowe w warunkach braku zakłóceń mogą poprawnie pracować ze znacznie słabszymi sygnałami obiektowymi (kilkadziesiąt/kilkaset razy w stosunku do warunków znamionowych), co oznacza możliwość znacznego rozszerzenia pasma obserwacji w stosunku do ww. 3 dB zakresu częstotliwościowego.



Rys. 3. Transmitancja testowa do badań jakości algorytmów korekcyjnych (filtr zerobiegowy)

By zweryfikować jakość działania algorytmów korekcyjnych dodatkowo do ww. „realnej” transmitancji, w celach testowych korzystano z transmitancji zero-biegunowej o charakterystyce jak na rysunku 3.

Filtr realizujący tę transmitancję ma mocno nieliniową fazę i pojedyncze zero na częstotliwości 3935 Hz. Formalnie jest strukturą pasmowo-przepustową o wąskim paśmie przepuszczania (3 dB) ulokowanym w zakresie częstotliwości 2-3 kHz (filtr projektowany był jako dolno-pasmowy eliptyczny 2 st., 3 kHz, 4/10 dB). Z uwagi na złożony kształt charakterystyki filtr ten jest dobrym obiektem testującym dla algorytmów korekcyjnych.

#### 4. Przykład — właściwości symulowanego systemu

Przykład rozważany w artykule dotyczy symulowanej sieci elektroenergetycznej nn o strukturze i właściwościach oddających realia pomiarowe obserwowane w sieci uczelnianej PW (rys. 1)<sup>3</sup>. Transformator zasilający SN/nn zastępuje tutaj źródło napięciowe o impedancji wewnętrznej  $10 \text{ m}\Omega/50 \mu\text{H}$ . Dwa prostowniki diodowe pracują w szczycie napięcia na obciążenie  $0,1 \Omega$ , co symuluje załączane w szczycie napięcia obciążenia istniejące w realnej sieci. Spłaszczają one zazwyczaj napięcia szczytowe przebiegu sieciowego i zmieniają dynamicznie impedancję zastępczą sieci.

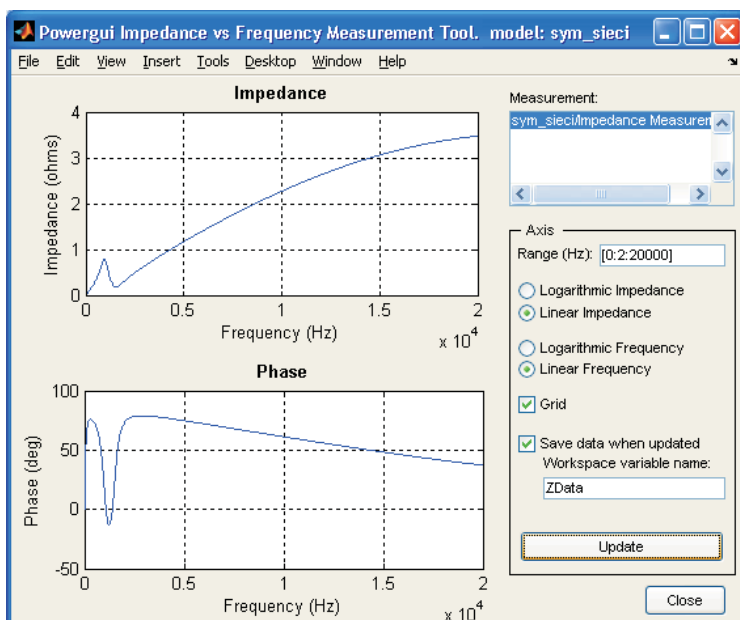
Na wyjściu transformatora włączone jest obciążenie  $1 \Omega$  (zastępuje obciążenia rezystancyjne sieci) oraz podłączona zostaje stratna pojemność ( $500 \mu\text{F}/0,1 \Omega$ ) do kompensacji mocy biernej. Impedancję linii zasilającej laboratorium badawcze realizuje dwójnik RL  $15 \text{ m}\Omega/40 \mu\text{H}$  — pracuje on na obciążenie PCC o wartości  $5 \Omega$ . Impedancję doziemną PCC w funkcji częstotliwości przedstawia rysunek 4. Rezonans w okolicy 1 kHz jest typowym skutkiem załączenia kondensatorów kompensacji mocy biernej w stacji rozdzielczej (widoczne na rysunku 1).

Rezonans ten w szczycie napięcia jest mniej wyraźny (rys. 5), tłumiony jest w modelu przez diody załączające dodatkowe obciążenie  $250 \text{ V}/0,1 \Omega$  w szczycie napięcia zasilającego — podobne właściwości ma żywa sieć ee.

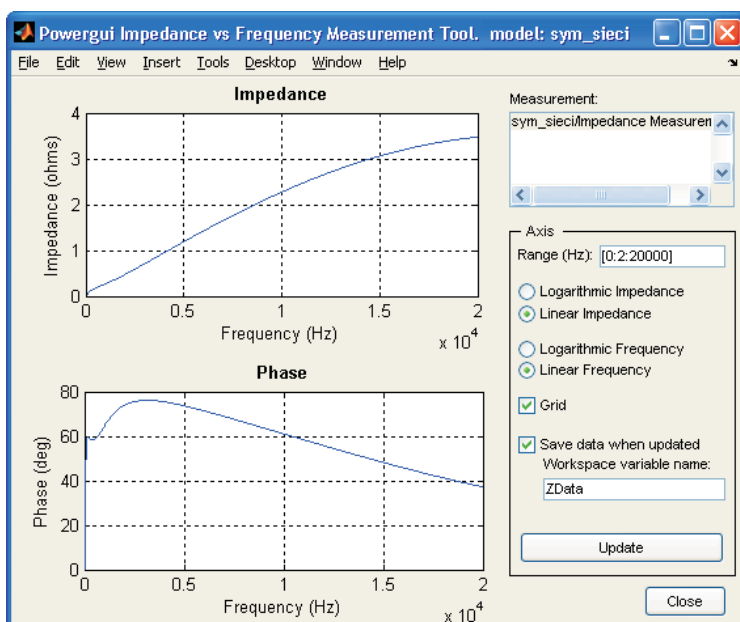
Z punktu widzenia właściwości PCC dwie impedancje z rysunków 4 i 5 współistnieją w sieci i są przełączane 100 razy/s przez prostowniki diodowe załączane w każdym szczycie napięcia fazowego. W zerze napięcia sieć jest niedociążona i rezonuje, w szczycie rezonans nie jest obserwowalny.

Ostatnia z charakterystycznych impedancji (rys. 6) pojawia się dla nietłumionej sieci (w zerze napięcia) po załączeniu dodatkowych, lokalnych (podłączonych do PCC) kondensatorów kompensacji mocy biernej ( $10 \mu\text{F}/0,1\Omega$ ). Z uwagi na podwój-

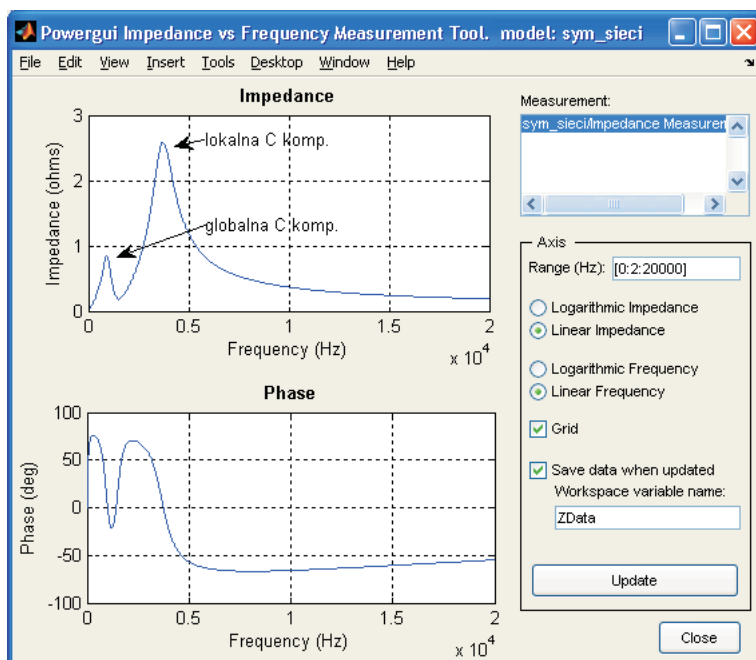
<sup>3</sup> W rzeczywistości obiekt realny stwarza dodatkowe wyzwania przy realizacji skutecznych algorytmów przetwarzania danych, związane głównie z niesymulowaną tutaj niestacjonarnością sieci ee.



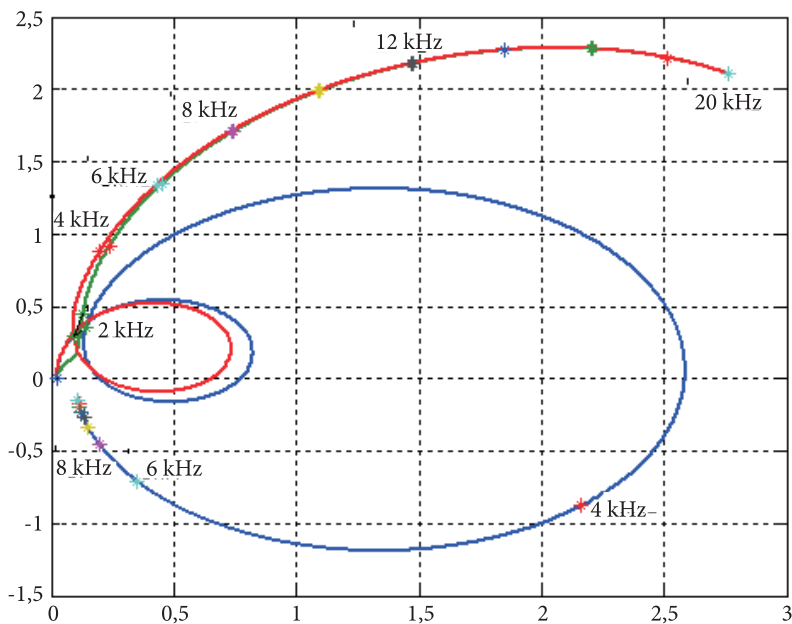
Rys. 4. Impedancja PCC przy załączeniu kondensatorów kompensacji mocy biernej w stacji rozdzielczej, diody obciążające w szczycie napięcia wyłączone



Rys. 5. Impedancja PCC przy załączeniu kondensatorów kompensacji mocy biernej w stacji rozdzielczej, jedna z diod obciążających w szczycie napięcia włączona (sieć stłumiona)



Rys. 6. Impedancja PCC z podwójnym rezonansem, włączone dwie baterie kondensatorów kompensacji mocy biernej (stacja rozdzielcza i lokalna), diody obciążające w szczycie napięcia wyłączone



Rys. 7. Trajektorie fazowe trzech impedancji testowych — wyznaczone z modelu numerycznego



ny rezonans i ciekawą charakterystykę, na niej demonstrowana jest skuteczność omawianych dalej procedur korekcyjnych (sekcja 6).

Kolejny rysunek (7) prezentuje w postaci trajektorii fazowych dane z rysunków 4-6. Taka forma prezentacji impedancji, nieco mniej intuicyjna, jest bardziej kompaktowa i będzie wykorzystywana w dalszej części artykułu.

Prezentowane na rysunkach 4-7 impedancje określone są na podstawie modelu używanego przez silnik środowiska SimPowerSystem/Simulink i odpowiadają chwilowym modelom analitycznym — tutaj wyznaczone są dla dwóch punktów pracy sieci: w szczycie i zerze przebiegu napięcia sieci (diody obciążenia szczytu on/off). Prezentowana tu w sposób widoczny zmienność czasowa modelu jest jednym z objawów niestacjonarności realnej sieci — stwarza ona zasadnicze problemy przy przetwarzaniu sygnałów pochodzących z realnych (a nie symulowanych, jak tutaj) obiektów. Problematyka symulowania zmiennej w czasie struktury omawiana jest w innych publikacjach Autorów i nie lokuje się bezpośrednio w tematyce tej publikacji [7].

W warunkach realnych modele sieci nie są dostępne (o ile nie zostaną wyznaczone), a impedancje, takie jak prezentowane na rysunkach 4-7, mogą być wyznaczone wyłącznie drogą eksperymentalną. Wyniki dla metody czasowej [8], użytej do wyznaczenia impedancji dla rekordów z okolic szczytu i zera napięcia zarejestrowanych przebiegów prądu i napięcia symulowanej sieci z rysunku 1, przedstawiają rysunki 8 i 9. Zauważyć należy, że wyniki te pochodzą z obserwacji symulowanego obiektu nieliniowego (sieć z obciążeniem diodowym), dając namiastkę zjawisk występujących w realnej sieci. Skutkiem nieliniowości jest odkształcone napięcie i obecność harmonicznych oraz okresowa zmienność czasowa właściwości modelu (model LPTV), stąd wypracowanie impedancji prezentowanych poniżej nie jest zupełnie trywialne [14]. Algorytmy korekcyjne, na które zorientowany jest artykuł, pracują na funkcji impedancji — nie jest więc ważne, z jakiego modelu (LPTV czy LTI) impedancja taka pochodzi. Stąd w kolejnych rozdziałach analizowany jest liniowy wariant struktury z rysunku 1, który łatwo uzyskano, ustawiając poziom napięcia źródeł obciążających diody powyżej napięcia szczytu. Taki liniowy model jest powszechnie używany i jednoznacznie rozumiały, co uzasadnia jego wykorzystanie w dalszej części pracy. Przedstawiona dyskusja dotycząca zmienności czasowej ma pokazać, że niniejsze opracowanie ma praktyczne zastosowanie również w opisie realnych, nie tylko liniowych, ale i zmiennych w czasie obiektów.

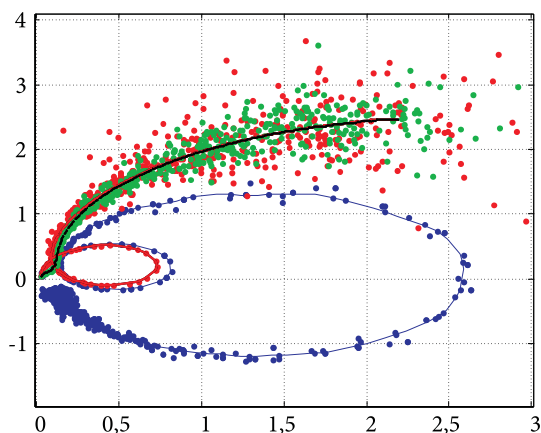
## 5. Przykład — badania sygnałowe modelu

Badania sygnałowe oznaczają obserwacje obiektu oparte o rejestracje sygnałów prądu i napięcia potrzebne do wyznaczenia impedancji. Są zatem bezpośrednio związane z eksperymentem. Omówione w rozdz. 4 właściwości dotyczą opisu

numerycznego obiektu symulowanego i w pewnym sensie odpowiadają modelom obwodowym obiektów realnych, o ile takowe są możliwe do wytworzenia.

### 5.1. Model zmienny w czasie (LPTV)

Prezentowane dane (modelu LPTV) pochodzą z przetwarzania sygnałów z idealnych torów obserwacyjnych (pracują wyłącznie antyaliasingowe filtry eliptyczne) — wyniki przedstawiają linie ciągłe. Punktami zaznaczono wyniki w warunkach zaszumienia sygnałów losowym szumem białym o właściwościach i energii zbliżonych do parametrów realnych zaszumień obserwowanych w sieci. Poziomą niepewność wyznaczanej w ten sposób impedancji koresponduje z danymi pochodzącymi z obserwacji realnych obiektów, stąd prezentowane dokładności wykresu punktowego są możliwe do uzyskania w praktycznie realizowanym pomiarze<sup>4</sup>.



Rys. 8. Obserwowane impedancje w modelu LPTV, widoczne nieznaczne deformacje bezszumowych chwilowych impedancji modelu liniowego (linie ciągłe)

Uzyskanie charakterystyk prezentowanych na rysunku 8 dla modelu zmiennego w czasie, nawet w warunkach symulowanych, nie jest łatwe. W rzeczywistości znaczenie i okresowa wymiana transmitancji (tu: czerwona–zielona z okresem zmiany 100 Hz) zachodzi w sposób płynny, a jej obserwacja i interpretacja nie jest oczywista [7].

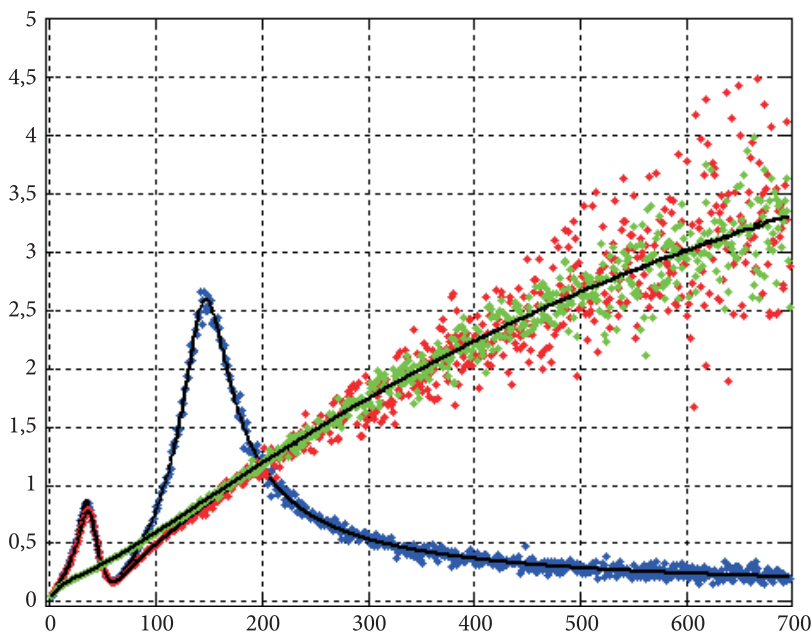
<sup>4</sup> Jakość wyznaczania transmitancji (niepewność i ewentualne błędy systematyczne) jest szczególnie istotna przy wypracowywaniu funkcji korekcyjnej omawianej w dalszej części artykułu, błędy jej wyznaczenia przenoszą się bowiem na każdy z kolejno wykonywanych pomiarów transmitancji.

## 5.2. Model liniowy (LTI)

Model liniowy (LTI) jest prostszy w analizie i dostarcza niemal identycznych jakościowo opisów impedancji jak model LPTV (porównaj rysunki 8, 9 i 10). Oznacza to, że proponowane w dalszej części artykułu procedury korekcyjne, prezentowane na przykładzie badań struktury LTI, mają charakter uniwersalny i mogą być stosowane nie tylko w obydwu modelach (LPTV i LTI), ale również w eksperymentach pomiarowych.

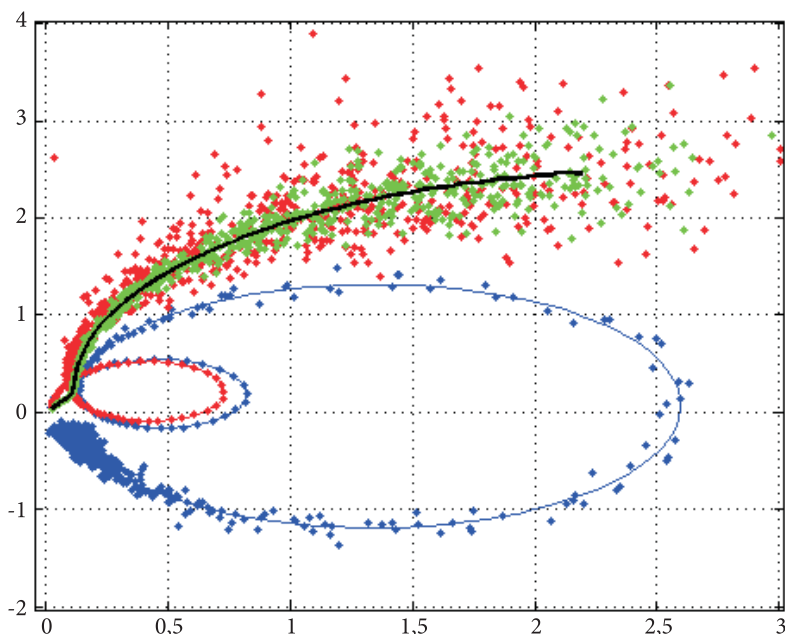
W modelu liniowym w warunkach braku zaszumienia otrzymywane estymaty impedancji są gładkie i nie odbiegają od wyznaczanych analitycznie (porównaj rysunki 7, 8 i 10, centralna linia zobrazowania — kolor niebieski). Z uwagi na symetrię torów i pełną zgodność pomiędzy modelem analitycznym LPTV i LTI uznać należy, że ten ostatni może być traktowany jako miarodajny do opisu właściwości zarówno modelowanego, jak i rzeczywistego obiektu.

Jak pokazano, idealny tor pomiarowy i realizowany tutaj sposób przetwarzania sygnałów w warunkach braku zaszumienia pozwalają na wyznaczenie prawdziwej charakterystyki częstotliwościowej impedancji (transmitancji)<sup>5</sup>. W praktyce



Rys. 9. Moduły trzech rozważanych impedancji — przypadek modelu liniowego, linie ciągłe — obserwacje bez szumów

<sup>5</sup> Jest tak w przypadku symulowanych obiektów, jak przypadek rozważany w tej publikacji.



Rys. 10. Trajektorie fazowe trzech rozważanych impedancji — przypadek modelu liniowego, linie ciągłe — obserwacje bez szumów

przypadek taki jest szczególnie i rzadko występuje. Problem ten (charakterystyki referencyjnej) rozwiązują wzorce bądź alternatywne pomiary wykonywane w sesji trenującej. W przypadku torów niesymetrycznych wtrącona (i zazwyczaj nieznaną) dodatkowa transmitancja toru przekłamuje wyznaczaną funkcję przejścia, co wymaga stosowania korekt, na które zorientowana jest dalsza część pracy.

## 6. Algorytmy korekcyjne — realizacja

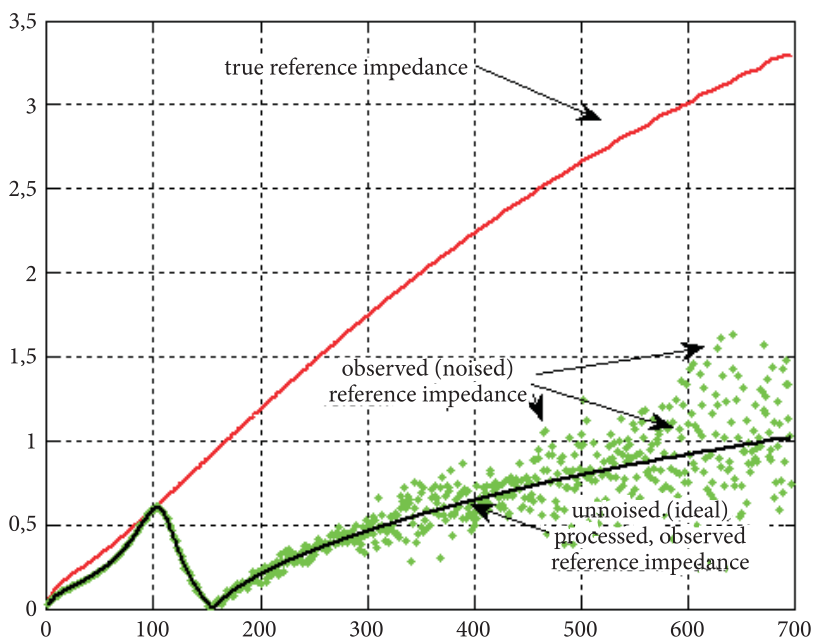
Ideą korygowania jest dokonywana przed pomiarem kalibracja procedur przetwarzania danych polegająca na wypracowaniu zespolonych mnożników pozwalających na odtworzenie prawidłowej postaci wzorcowej transmitancji w warunkach nieidealnego toru pomiarowego.

### Krok 1

W fazie kalibracji dla nieznanego stanu obwodów wejściowych wyznaczana jest znana transmitancja obiektu wzorcowego.

W rozważanym przypadku jako impedancja wzorca wykorzystywana jest impedancja stłumionej sieci — formalnie może być to każda inna znana a priori

transmitancja (znana z alternatywnego prawidłowego pomiaru bądź opisu analitycznego). Transmitancję tę (tu wytlumiona sieć, bez rezonansów) przedstawiają rysunki 5, 7 (tylko kolor zielony), 8, 9 i 10 (czarna linia na tle zobrazenia zielonego). Transmitancja ta podlega pomiarowi kalibracyjnemu przez nieidealny przyrząd. Uzyskane wyniki i charakterystykę właściwą przedstawia rysunek 11.

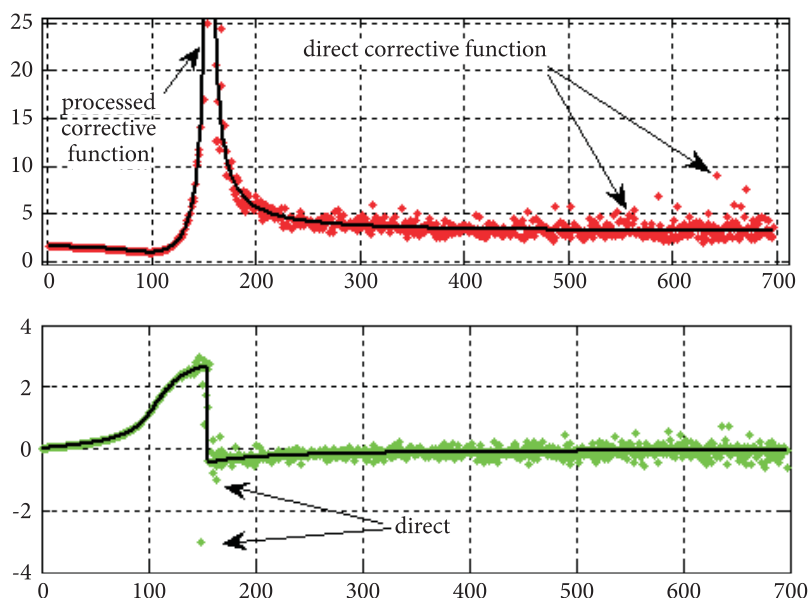


Rys. 11. Kalibracja: zmierzona i referencyjna impedancja wzorcowa, filtr zero-biegunowy w torze napięciowym

Dla przypadku prezentowanego na rysunku 11 w torze pomiaru napięcia włączono transmitancję testowego filtra eliptycznego (rys. 3). Wypracowana przez tak rozsymetryzowany tor pomiarowy transmitancja obiektu testowego (linia czerwona) przedstawiona jest jako zdeformowana właściwościami nowego toru funkcja (punkty zielone) dająca bezpośredni zafalowany obraz poszukiwanej rzeczywistości.

## Krok 2

Ideą korekty jest wyznaczenie odwrotnej funkcji korygującej (rys. 12) pozwalającej na sprowadzenie obserwowanej transmitancji (kolor zielony) do jej prawidłowej postaci (kolor czerwony). Ta zespolona funkcja korekcyjna realizuje odwrotny filtr korygujący niesymetrię torów przetwarzania (bez względu na ich lokalizację). W omawianym przypadku jest to filtr odwrotny do wprowadzonego



Rys. 12. Funkcja korygująca: wersja zasumiona (kropki) i idealna (linia ciągła): góra — charakterystyka amplitud; dół — fazowa (oś y radiany)

w tor. Porównanie rysunków 3, 11 i 12 przekonuje o prawidłowości tak wypracowanej funkcji korekcyjnej.

Przedstawiony sposób trenowania potencjalnego przyrządu do pomiaru transmitancji w warunkach realnych nie jest tak idealny jak wyżej przedstawiono.

Pierwszym problemem jest transmitancja wzorcująca (rys. 11 — kolor czerwony) — musi ona istnieć fizycznie i być znana bądź mierzalna. Mierzalna z użyciem alternatywnego pomiaru, gdyż będzie używana do wzorcowania „niewytrenowanego” przyrządu. Niepewność jej określenia powinna być mniejsza niż szacunkowa niepewność metody pomiarowej wbudowanej w przyrząd — stwarza to pewne wyzwania natury praktycznej.

Drugim problemem jest transmitancja obserwowana (rys. 11 — kolor zielony). Jak wspomniano, zazwyczaj nie jest ona tak idealna, jak to przedstawiono na rysunku 11 jako linię czarną. Jest jedną z wielu możliwych do wyznaczenia przez przyrząd transmitancji, ale dotyczy obserwacji obiektu wzorcującego. Rutynowa niepewność jej wyznaczania nie odbiega od niepewności pomiaru innych transmitancji mierzonych przez przyrost i prezentowanych w niniejszym artykule (wyniki takiego pomiaru zaznaczono zielonymi punktami na rysunku 11). Na szczęście pomiar wzorcujący może być realizowany w bardziej wyrafinowany sposób, gdyż często prowadzony jest w warunkach laboratoryjnych. Może być wielokrotnie powiawiany w celu usunięcia błędów losowych, a uzyskane wyniki są poddane postprocessingowi skupionemu na wypracowaniu gładkich funkcji korekcyjnych.

Oznacza to, że racjonalny sposób postępowania może doprowadzić w realnych warunkach do uzyskania wysokiej jakości funkcji korekcyjnej jak to ma miejsce w przypadku rysunków 11, 12 (zobrazowanie linią ciągłą) i związanego z nimi omówienia.

Kolejne prezentacje zakładają będą możliwość wypracowania i dostęp do takiej dobrej funkcji korekcyjnej. Jest to, jak wspomniano trywialnie łatwe w przypadku obiektu symulowanego<sup>6</sup>.

## 7. Wyniki

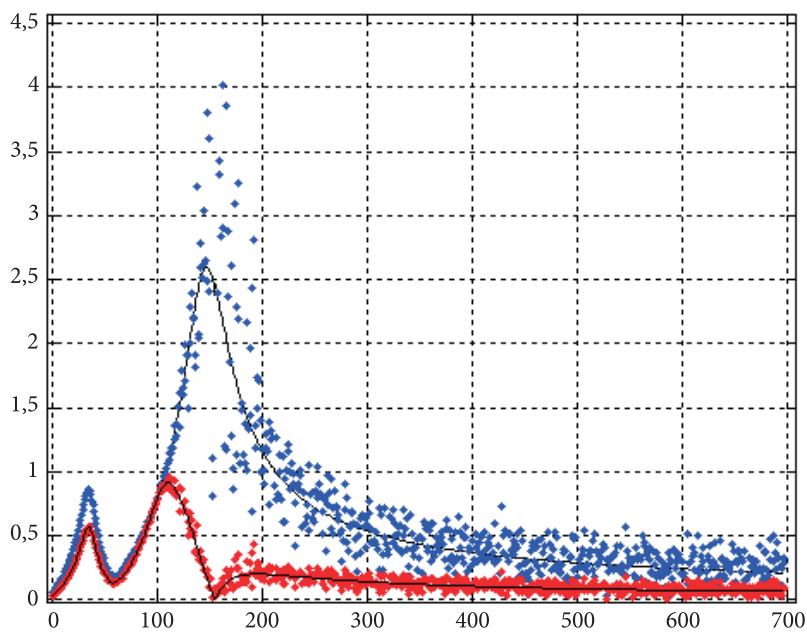
Badaniu podlegały różnego rodzaju konfiguracje torów wejściowych, w których na tor prądowy i napięciowy włączano na wszelkie dopuszczalne sposoby dwie impedancje testowe *butter* i *ellip* omawiane wcześniej (rozd. 3). Każdorazowo, po zestawieniu nowej konfiguracji, wykonywano procedurę kalibracyjną wypracowującą gładką funkcję korygującą (patrz omówienie w rozdz. 6). Skalibrowany w ten sposób wirtualny przyrząd wykorzystywano do wypracowania impedancji różnorodnych konfiguracji sieci.

Z uwagi na brak miejsca poniżej prezentowane są wyłącznie wyniki wyznaczania impedancji dla sieci z podwójnym rezonansem (dwie pojemności użyte do kompensacji mocy biernej). Podobnej jakości, niebudzące problemów interpretacyjnych wyniki uzyskano dla pełnego zestawu wykonanych testów.

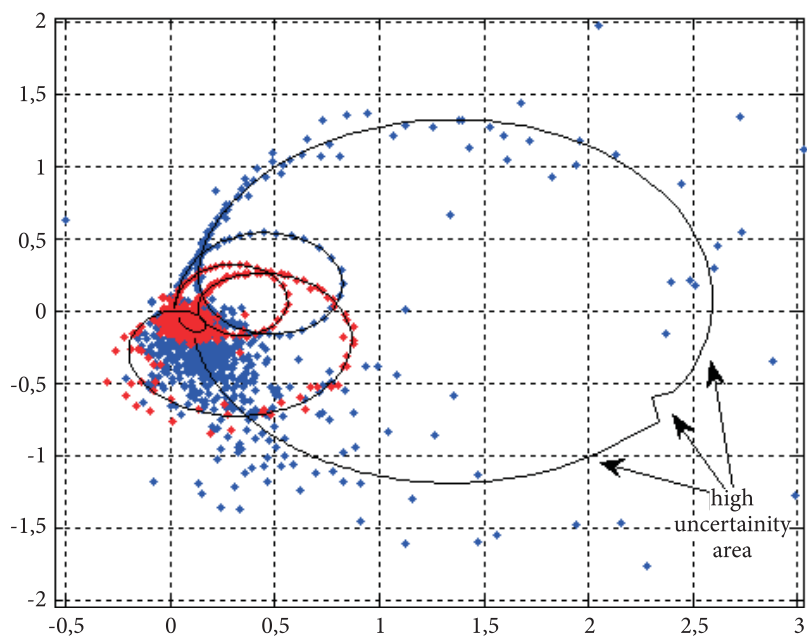
Pierwszy test polegał na wymianie obiektu obserwowanego przez przyrząd skalibrowany zgodnie z opisem z rozdz. 4. Na rysunku 13 pokazano zdeformowaną obserwowaną charakterystykę częstotliwościową tego nowego obiektu (punkty czerwone) oraz odtworzoną po zastosowaniu korekcji (punkty niebieskie). Ciągłą linią zaznaczono wyniki uzyskane przy braku zaszumienia obserwowanych sygnałów. Są one niemal idealne, nawet w przypadku ekstremalnie niskich pobudzeń i wysokich wartości mnożników funkcji korekcyjnej w obszarze zera wtrąconej w tor napięciowy transmitancji filtra desymetryzującego (patrz rysunki 7, 9, 10, 13 i 14).

Mniej wyidealizowane wyniki (uzyskane dla przebiegów zaszumianych — prezentowane w postaci punktów) nie są dobrej jakości i wykazują znacznie większą niepewność niż wyniki pochodzące z przyrządu referencyjnego (rys. 9 i 10). Nie jest to nic niepokojącego przy nierealistycznie niekorzystnych właściwościach częstotliwościowych transmitancji desymetryzującej (rys. 3).

<sup>6</sup> Naprawdę również w obiekcie symulowanym istnieją szумы i przekłamania sygnałów zależne od zaimplementowanych metod i parametrów rozwiązywania równań różniczkowych, są one o rzędu wielkości mniejsze od wprowadzanych w referacie szumów obiektowych (patrz detale na rysunkach 10 i 14). Właściwość ta pozwala traktować symulacje jako miarodajne do opisu właściwości realnych obiektów.



Rys. 13. Zmierzona i odtworzona impedancja sieci z podwójnym rezonansem, filtr zero-biegunowy w torze napięciowym, charakterystyka amplitudowa

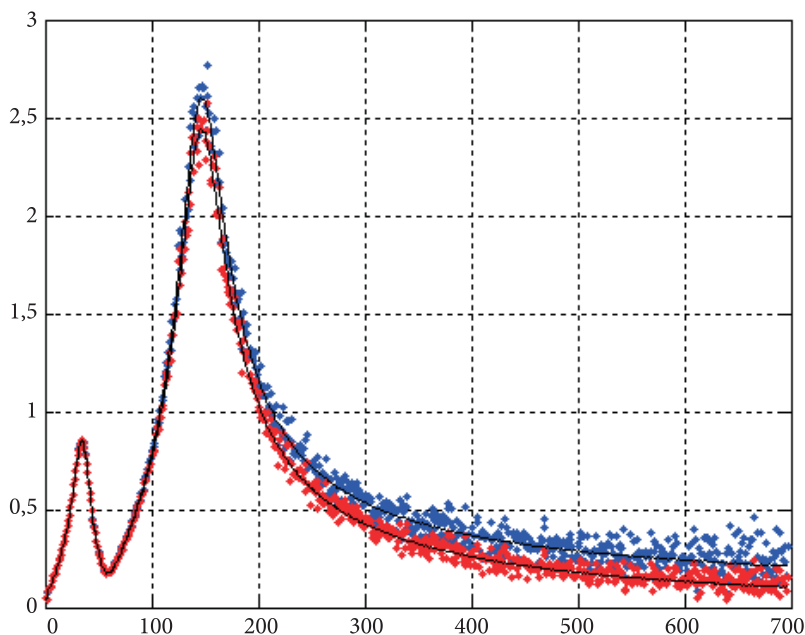


Rys. 14. Odtwarzanie impedancji z dwoma rezonansami, filtr zero-biegunowy w torze napięciowym, trajektorie fazowe



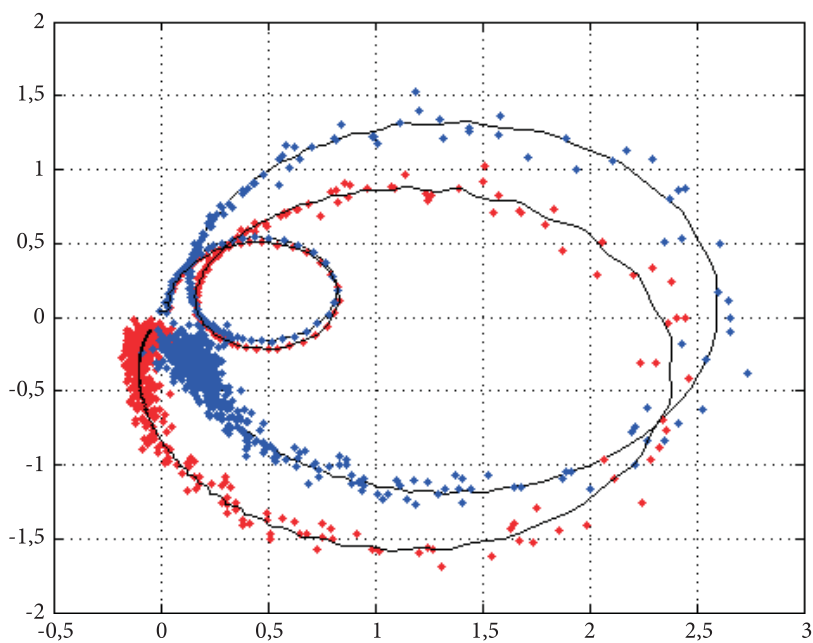
Bardziej realistyczne scenariusze pomiarowe pokazano na rysunkach 14-17 w warunkach desymetryzacji jednego z torów realną transmitancją przekładnika napięcia. Transmitancja ta nieznacznie deformuje charakterystykę amplitudowo-fazową przetwarzanej impedancji, a jej korekta nie wiąże się ze znaczącym zwiększeniem niepewności wyznaczania impedancji.

Na rysunku 16 przedstawiono działanie korekty wpływu transmitancji przetwornika wtrąconego w tor napięciowy. Zgodnie z charakterystyką częstotliwościową przetwornika (rys. 2) obserwowany jest stłumiony i przesunięty w fazie obraz prawidłowej impedancji w sposób mniej wyraźny, ale podobny do wprowadzanego przez omawiany wcześniej filtr tłumiący sygnał, co pokazano na rysunkach 13 i 14. Zmiany impedancji wyraźniejsze są dla wyższych częstotliwości, co jest zgodne z charakterystyką filtru z rysunku 2. Stosowna funkcja kompensacyjna pozwala wyznaczyć właściwą impedancję zgodnie z wykresem koloru niebieskiego, adekwatną do impedancji wyznaczonej teoretycznie i poprzez pomiar referencyjny (porównaj rysunki 6, 7, 9, 10, 14 i 15).

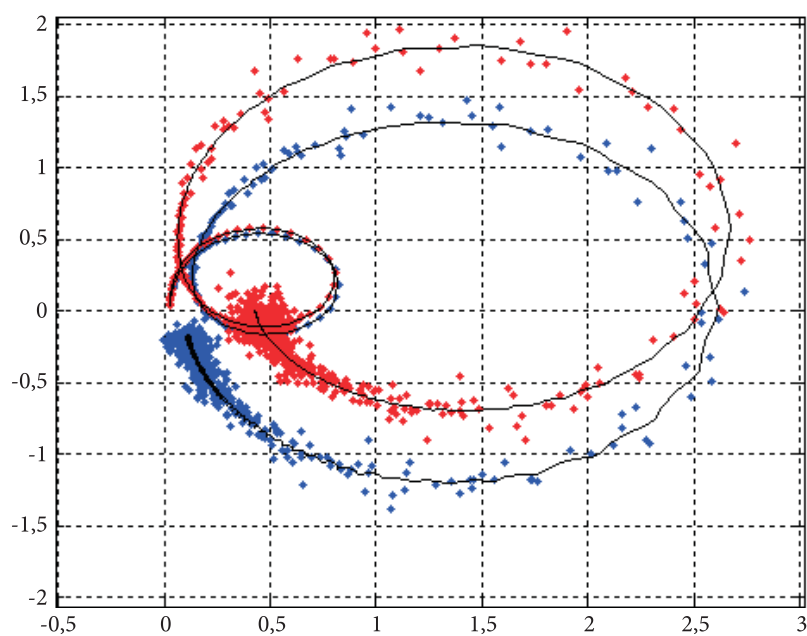


Rys. 15. Odtwarzanie impedancji z dwoma rezonansami, transmitancja przekładnika w torze napięciowym, charakterystyka amplitudowa

Kolejna prezentacja dotyczy symetrycznego przypadku, tym razem przetwornik wtrącony jest w tor prądowy. Nowa funkcja korekcyjna również prawidłowo odtwarza właściwą postać mierzonej impedancji (rys. 17).



Rys. 16. Odtwarzanie impedancji z dwoma rezonansami, transmitancja przekładnika w torze napięciowym, trajektorie fazowe



Rys. 17. Odtwarzanie impedancji z dwoma rezonansami, transmitancja przekładnika w torze prądowym, trajektorie fazowe

## 7. Podsumowanie i wnioski

W artykule rozważano problematykę poszerzania pasma obserwacji przy wyznaczaniu charakterystyk częstotliwościowych transmitancji wyznaczanych metodą analizy cyfrowej sygnałów pobudzenia i odpowiedzi. Rozważano konkretny problem pomiarowy wyznaczania impedancji zastępczej sieci elektroenergetycznej, co nadaje pracy aspekt praktyczny.

Prezentowane dane w ewidentny sposób wykazują, że prawdziwym ograniczeniem pasma częstotliwościowego wyznaczania transmitancji są niepewności związane z trudno usuwalnymi poprzez CPS szumami i niestacjonarnością obserwowanego obiektu.

Zaproponowane wzorcowanie przyrządu/wirtualnego przyrządu do wyznaczania transmitancji po każdej zmianie jego parametrów w zasadzie rozwiązuje problem błędów systematycznych, na eliminacji których skupiony jest niniejszy artykuł.

Uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność zaproponowanej metody cyfrowej korekty przekłamań transmitancji wynikających z asymetrii torów przetwarzania sygnału pobudzenia i odpowiedzi badanego systemu. Jak wykazano we wstępnej części pracy, korekcja może być stosowana zarówno do modeli liniowych, jak i quasi-liniowych charakteryzujących się zmiennością czasową transmitancji.

Stosując symulacje nastawione na możliwie bliskie odtworzenie warunków obiektowych, analizowano przydatność zaproponowanych metod do badania impedancji sieci elektroenergetycznej. Problemem pomiarowym jest w tym przypadku konieczność wykorzystywania różnego rodzaju przetworników pierwotnych dwóch różnych wielkości elektrycznych (prąd i napięcie), których parametry częstotliwościowe (szczególnie charakterystyki fazowe) deformują bezpośrednio wyznaczone impedancje [9]. Metoda kompensuje globalnie błędy systematyczne przetworników bez potrzeby stosowania złożonych lokalnych układów korekcyjnych analogowych [16] lub cyfrowych [6]. Jest idealna do wbudowania w realny bądź wirtualny przyrząd do pomiaru wszelkiego rodzaju transmitancji.

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] PINTELO R., ROLAIN Y., BOSSCHE M.V., SCHOUKENS J., *Towards an ideal data acquisition channel, Instrumentation and Measurement*, IEEE Transactions on, vol. 39, issue 1, Feb 1990, 116-120.
- [2] KOLLAR I., ROLAIN Y., *Complex correction of data acquisition channels using FIR equalizer filters*, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 42, issue 5, Feb 1993, 920-924.
- [3] D'ANTONA G., FERRERO A., OTTOBONI R., *Improvement of metrological performance for low-cost DSP-based board with analog interface circuit*, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 48, issue: 6, Dec 1999, 1278-1281.

- [4] DELLE FEMINE A., GALLO D., LANDI C., LUISO M., *A technique for real-time correction of measurement instrument transducers frequency responses*, Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008, IMTC 2008, IEEE, 2008, 2032-2037.
- [5] DELLE FEMINE A., GALLO D., LANDI C., LUISO M., *Power quality monitoring instrument with FPGA transducer compensation*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, issue 9, 2009, 3149-3152.
- [6] GALLO D., LANDI C., LUISO M., *Real time digital compensation of current transformers over a wide frequency range*, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 59, issue 5, 2010, 1119-1126.
- [7] XI CHEN AND SHUIBAO YU, *Frequency response improvement for interial magnetoelectric velocity sensor using frequency-selected compensation network*, IEEE Sensors Journal, vol. 13, no 11, 2013, 4141.
- [8] STAROSZCZYK Z., KALICKI A., *Quality evaluation of virtual instrumentation for power system harmonics investigations-multichannel signal conditioning problems*, Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, vol. 2, 2002, 985-989.
- [9] LUSZCZ J., SMOLENSKI R., *Voltage harmonic distortion measurement issue in smart-grid distribution system*, Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2012 Asia-Pacific Symposium on, 2012, 841-844.
- [10] ŁUSZCZ J., *Voltage harmonics transfer through medium voltage instrument transformers*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 88, nr 8, 2012, 54-56.
- [11] KACZMAREK M., NOWICZ R., *Comparison of wide frequency metrological properties of inductive current transformers*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 88, nr 8, 2012, 63-65.
- [12] KLATT M., MEYER J., ELST M., SCHEGNER P., *Frequency responses of MV voltage transformers in the range of 50 Hz to 10 kHz*, 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010, 1-6.
- [13] CATALIOTTI A., DI CARA D., EMANUEL A.E., NUCCIO S., *Characterization of clamp-on current transformers under nonsinusoidal conditions*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 24, no. 1, 2009, 373-380.
- [14] STAROSZCZYK Z., FIGOŃ P., *Symulacyjne badania porównawcze metod identyfikacji struktur liniowych okresowo zmiennych w czasie*, Pomiary, Automatyka, Kontrola, vol. 53, nr 9, 2007, 55-58.
- [15] STAROSZCZYK Z., *A method for real-time, wide-band identification of the source impedance in power systems*, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 54, iss. 1, 2005, 377-385.

Z. STAROSZCZYK, P. FIGOŃ

**Band extension in digital methods of transfer function determination  
— signal conditioners asymmetry error corrections**

**Abstract.** In the paper, the calibrating method for error correction in transfer function determination with the use of DSP has been proposed. The correction limits/eliminates influence of transfer function input/output signal conditioners on the estimated transfer functions in the investigated object. The method exploits frequency domain conditioning paths descriptor found during training observation made on the known reference object.

**Keywords:** transfer function, band extension, error correction, phase errors