

Wstęp

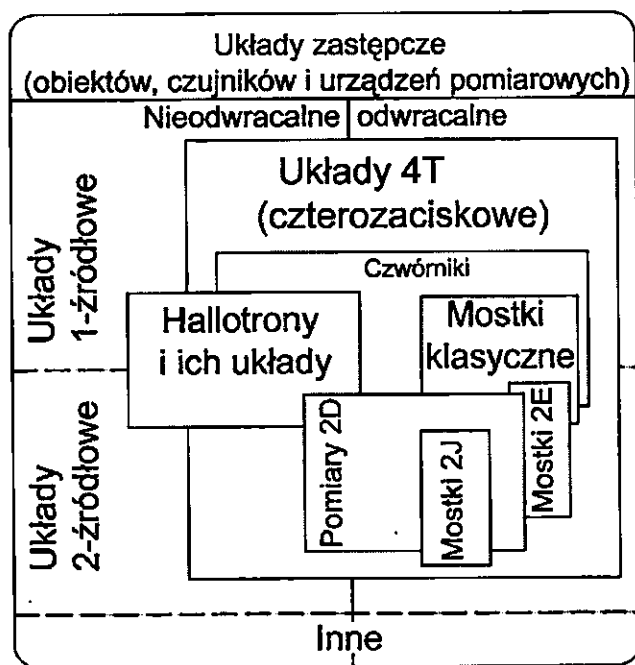
W pracy przedstawiono jednolite podstawy teoretyczne oraz opis właściwości metrologicznych niekonwencjonalnych rozwiązań immitancyjnych układów wstępnego kondycjonowania sygnałów w pomiarach pośrednich dwu i większej liczby parametrów ze sobą skojarzonych. Sygnały takie występują zarówno na wyjściach wieloparametrowych obiektów badanych, jak i w układach wejściowych inteligentnych przyrządów i systemów pomiarowych zawierających czujniki immitancyjne. Dla większości z nich jako modele można stosować schematy zastępcze w postaci układów SLS (skupionych, liniowych, stacjonarnych) odwracalnych i nieodwracalnych o zmiennych immitancjach wewnętrznych, ogólnie z n końcówkami, czyli n -biegunników (nT). Układy modeluje się schematem zastępczym o znanej lub zakładanej strukturze wewnętrznej. Zmiany ich parametrów wewnętrznych mogą być całkowicie niezależne, jak i ze sobą skojarzone poprzez wpływy jednej lub kilku wielkości zewnętrznych oddziałujących na nie równocześnie oraz różnie w czasie i w przestrzeni oraz wskutek odwracalnych i nieodwracalnych procesów wewnętrznych, np. grzania własnego, pól magnetycznych od prądów, zmian starzeniowych itp. Jeśli ponadto układy te są nierozłączalne i o niedostępnym wnętrzu, to zmiany składowych ich immitancji wewnętrznych można wyznaczyć tylko pośrednio - poprzez pomiary związanych z nimi prawami Kirchoffa parametrów na zewnętrznie dostępnych końcówkach (zaciskach). Zadania pomiarowe mogą obejmować identyfikację ilościowych zmian kilku parametrów wewnętrznych układu elektrycznego (badania i monitoring obiektów, diagnostyka parametryczna), sprawdzenie funkcji wiążących poszczególne parametry z oddziałującymi na nie wielkościami elektrycznymi bądź nieelektrycznymi oraz wyznaczenie tych wielkości na podstawie przekształceń odwrotnych. W wielu układach mostkowych trzeba mierzyć zmiany parametrów na zaciskach spowodowane równoczesnymi przyrostami kilku immitancji wewnętrznych, np. przy stosowaniu czujników nieselektywnych o parametrach zależnych od jednej lub kilku wielkości równocześnie oraz przy badaniu lub diagnostyce wnętrza układów z czterech zacisków (4T), bądź ośrodków ciągłych, obiektów technicznych i próbek materiału odpowiednio rozmieszczonymi czterema elektrodami.

Jednolite i uogólnione ujęcie powyższych problemów z metrologicznego punktu widzenia nie występowało dotąd w literaturze. Celem niniejszej pracy, obok stworzenia takiego ujęcia, było opracowanie nowych możliwości

równoczesnych pomiarów dwu (2D) i więcej skojarzonych ze sobą parametrów poprzez przystosowanie do tego celu klasycznych mostkowych układów pomiarowych i zaproponowanie nowych ich rozwiązań.

Niniejsza monografia w dużym stopniu jest syntezą krajowych i międzynarodowych publikacji autora, opracowanych w większości w ostatnich kilku latach [27-48]. Jedyne rozdział 6 - o schematach zastępczych hallotronów, stanowi uaktualnioną wersję wcześniej opracowanego przez autora rozdziału 6 z monografii Technika hallotronowa [26], w kilku rozdziałach której podsumował on badania własne i wspólne (w tym z wypromowanym przez niego doktorem) dotyczące zastosowań hallotronów w pomiarach i konstrukcji unikalnej aparatury hallotronowej.

Szczegółowe rozważania przeprowadza się w pracy na reprezentatywnym przykładzie układu o dowolnie zmiennych parametrach wewnętrznych, którego cztery końcówki są wyodrębnione jako zaciski zewnętrzne, czyli jako 4-biegunnika nazywanego tu akronimem: układ 4T (skrót ang. Four Terminals). Omawia się jego zastosowania do równoczesnych pomiarów dwu (2D) i większej liczby parametrów. Prądy płynące z zewnątrz przez trzy zaciski takiego układu mogą być dowolne, czwarty zaś wynika już z prądowego prawa Kirchoffa. Wzajemne relacje układów omawianych w monografii i pomiarów dwuparametrowych (2D) przedstawia rysunek.



Poniżej zostanie zarysowana treść poszczególnych rozdziałów.

Rozdział 1 wprowadza w istotę problematyki i jej zakres oraz przedstawia metody wybrane do rozwiązywania dalszych zagadnień. Aby rozważaniami opisowymi zbytnio nie obciążać zasadniczej treści, kontynuację wprowadzających punktów 1.1- 1.3 przeniesiono do Dodatku 1. Omawia się w nim współczesne zadania pomiarów impedancyjnych, specyfikę układów wstępnego kondycjonowania sygnałów oraz podaje zarys wcześniejszych polskich prac w dziedzinie mostkowych układów pomiarowych i ich modyfikacji stosowanych w teslomierzach i przetwornikach hallotronowych.

Jako podstawę opisu pośrednich pomiarów parametrów skojarzonych układu nT i wielkości na nie wpływających, zaproponowano podział macierzy admitancyjnej Y lub impedancyjnej Z dowolnego bezźródłowego liniowego układu nieodwracalnego na dwie macierze, które ujmują część odwracalną - pasywną i część antyodwracalną tego układu. Podstawowym schematem zastępczym odwracalnego układu $4T$ jest czworobok zupełny, czyli czteroramienny mostek z przekątnymi. Nieodwracalny układ $4T$ zawiera ponadto 1-3 żyratorów. Jego przykładem jest schemat zastępczy hallotronu $4T$ zawierający jeden żyrator. Podano też równania dla różnych rodzajów współpracy układu $4T$ z dołączanymi doń obwodami, w szczególności jako czwórnika oraz układu pomiarowego o dwuprądowym zasilaniu i dwu wyjściach napięciowych. Zestawiono możliwe kombinacje zmian rezystancji mostka czteroramiennego ($4R$), które mogą występować w pomiarach dwuparametrowych ($2D$). Jako wprowadzenie w zagadnienie tych pomiarów porównano wstępnie podstawowe właściwości niezrównoważonych mostków klasycznych i zaproponowanych przez autora mostków dwuwyjściowych, które zasila się niekonwencjonalnie - z dwu źródeł prądowych dołączanych równoległe do ramion przeciwległych.

W następnych czterech rozdziałach szczegółowo analizuje się właściwości metrologiczne odwracalnego układu $4T$ przy różnie zmieniających się parametrach wewnętrznych i różnym zasilaniu ze źródeł prądu stałego oraz omawia się ich zastosowania w równoczesnych pomiarach dwu ($2D$) i więcej parametrów. W szczególności, w rozdziale 2 opisano pracę odwracalnego rezystancyjnego układu $4T$ jako czwórnika. Jego schematem zastępczym jest czwórnik typu X , czyli czteroramienny mostek niezrównoważony oznaczany tu symbolem $4R$. Podano wzory dla parametrów roboczych na zaciskach jego wrót wejściowych i wyjściowych w funkcji bezwzględnych i względnych zmian rezystancji ramion od stanu równowagi. Przedstawiono też kilka nieznanych dotąd zależności w mostkach klasycznych, w tym ogólny opis zmian parametrów dowolnego mostka jako czwórnika w funkcji względnych wartości i przyrostów elementów jego macierzy impedancyjnej od stanu równowagi, rozszerzenie warunku równowagi o iloczyn rezystancji wejściowej i wyjściowej oraz ogólne warunki linearyzacji przebiegu zmian parametrów zewnętrznych

układu. Podano też schemat zastępczy mostka niezrównoważonego w postaci czwórnika 2T, który zachowuje potencjały jego zacisków¹. Te nowe ujęcia wykorzystano następnie w rozdziale 4 do omówienia niekonwencjonalnych zastosowań mostków klasycznych w pomiarach dwuparametrowych (2D), w tym w układzie dwu mostków połączonych kaskadowo (mostek w mostku). Zaś w rozdziale 8 (punkty 8.1 – 8.8) podano szczegółowe opisy miar dokładności tych mostków w pomiarach kilkuparametrowych.

Rozdziały 3, 5, 7 i punkty 8.9 - 8.10 zawierają omówienie podstawowych zależności i właściwości metrologicznych nowej rodziny układów pomiarowych 4T, nazwanych mostkami dwuprądowymi i analizę możliwości ich zastosowań w równoczesnych pomiarach dwu (2D) i więcej parametrów. Układy te zasilają się niekonwencjonalnie z jednego przełączanego lub z dwu jednakowych źródeł prądowych dołączanych równolegle do ramion przeciwległych mostka. Są to układy o dwu wyjściach – z obu przekątnych i o dwu warunkach równowagi, odmiennych niż dla mostków klasycznych – w postaci równości iloczynu impedancji ramion przyległych do zacisków danego wyjścia. Te niestosowane dotąd w praktyce układy pomiarowe stwarzają wiele zupełnie nowych możliwości przy ich wykorzystaniu na wejściach torów immitancyjnych wieloparametrowych inteligentnych systemów, przetworników i przyrządów pomiarowych, zarówno przy prądzie stałym, jak i przemiennym. W szczególności rozdział 3 poświęcono szczegółowemu opisowi zależności parametrów zewnętrznych dwuprądowych mostków rezystancyjnych 4R przy dowolnie zmiennych rezystancjach ramion i dwu wyjściach. Podano też ich dualne odpowiedniki, zasilane z dwu źródeł napięciowych. Zaś w rozdziale 5 omówiono zastosowania mostków dwuprądowych w pomiarach dwu, trzech i czterech parametrów przy prądzie stałym.

Przykłady kilku innych rozwiązań układów dwuprądowych przedstawiono w rozdziale 7, w tym układ aktywny z samorównoważającym się mostkiem (DC) o wyjściu prądowym z przesuniętym początkiem zakresu oraz dwuprądowe mostki RC i RC-R prądu przemiennego (AC). Przedstawiono je na tle mostków de Sautego, zazwyczaj zwanych szeregowymi mostkami Wiena. Przy dwu równoważeniach umożliwiają one pomiary trzech spośród składowych impedancji ramion pojedynczego układu mostkowego.

W rozdziale 6 rozpatruje się bardzo gruntownie, wraz ze zjawiskami pasożytniczymi, układ nieodwracalnego czujnika 4T na przykładzie schematów zastępczych hallotronów.

¹ Uogólnione ujęcie właściwości mostków niezrównoważonych podane w tym rozdziale, jako oryginalne, zostało w całości zaakceptowane do najnowszego, przewidywanego też do udostępnienia w Internecie, anglojęzycznego międzynarodowego poradnika budowy systemów pomiarowych wydawnictwa J. Wiley & Sons [46, 47].

W rozdziale 8 wyznaczono miary niedokładności dla obu rodzajów mostkowych układów rezystancyjnych 4T o zmiennych parametrach wewnętrznych i dla kilku przykładów ich zastosowania w pomiarach dwuparametrowych.

W rozdziale 9 dokonuje się krótkiego podsumowania pracy i wytycza się kierunki dalszych działań. Opisano też badania z zakresu mostków dwuprądowych prowadzone przez inne osoby, a zainspirowane publikacjami autora oraz scharakteryzowano szczegółowo najważniejsze wnioski.

Bibliografia obejmuje 84 pozycje i składa się z dwu części. Część B1 - *Literatura podstawowa*, jest bezpośrednio związana z tematyką monografii i obok literatury podstawowej o mostkach podanej według kolejności opublikowania, zawiera też 21 oryginalnych prac autora o właściwościach mostków klasycznych jako czwórników i o mostkach dwuprądowych oraz ich zastosowaniach w pomiarach kilkuparametrowych. Część B2 - *Literatura uzupełniająca*, dzieli się na: B2.1 - *Zestawienie wybranych wcześniejszych polskich prac o mostkach* oraz B2.2 - *Podstawowe pozycje książkowe z teorii obwodów* związane z tematyką pracy.

Pracę uzupełnia omówiony już Dodatek 1. Na końcu zamieszczono spis treści w języku angielskim i abstract.

Zagadnienia zawarte w pracy dotyczą pozyskiwania i wstępnego kształtowania sygnałów pomiarowych w układach immitancyjnych 4T oraz stanowią podstawę do rozwiązywania problemów odwrotnych - rekonstrukcji wielkości mierzonych (lub ogólniej - mesurandów) na podstawie tych sygnałów. Obejmuje to w równej mierze autonomiczne pomiary parametrów wewnętrznych schematu zastępczego układów elektrycznych z ich zacisków, jak i czujnikowe układy wejściowe przetworników i systemów pomiarowych. Są to w większości zagadnienia z obszaru modelowania matematycznego czujników, układów i urządzeń pomiarowych, służące etapowi pierwszemu tworzenia modelu, nazywanemu „identyfikacją strukturalną modelu”² z trudną w praktyce koniecznością uwzględnienia jego właściwości metrologicznych, w tym miar niedokładności. Niniejsze opracowanie opiera się na długoletnim doświadczeniu piszącego te słowa w identyfikacji i metodach doskonalenia takich właściwości, zdobytym przy opracowywaniu i stosowaniu wielu nowych urządzeń pomiarowych i diagnostycznych, w tym zawierających też układy mostkowe i hallotrony.

Tematyka pracy nie była dotąd ujmowana w literaturze w taki syntetyczny i uogólniony sposób. Jest ona szczególnie aktualna ze względu na

² Warto tu zacytować opinię polskiego przedstawiciela w IMEKO prof. Romana Morawskiego podaną w pracy [83] „*etap ten ... jest o tyle trudny, gdyż jego realizacja w większym stopniu opiera się na intuicji, doświadczeniu i innych umiejętnościach typu heurystycznego...*”.

ogromne możliwości aplikacyjne, jakie dla realizacji coraz powszechniejszych pośrednich pomiarów wieloparametrowych stwarza współcześnie technologia elektroniczna, umożliwiając stosowanie wielobitowych przetworników analogowo-cyfrowych AD, źródeł zasilających o dużej stabilności, przetworników cyfrowego przetwarzania sygnałów DSP, układów mikroprocesorowych MEMS wyposażonych w pamięci i inteligencję (odpowiednie oprogramowanie) oraz wielu opracowanych algorytmów przetwarzania sygnałów zarówno deterministycznych, jak i losowych, w tym opartych na sieciach neuronowych i zbiorach rozmytych. Aby jednak można było w pełni te możliwości wykorzystywać do tworzenia sprzętowej i wirtualnej aparatury pomiarowej, trzeba dysponować odpowiednio wiarygodnymi sygnałami, otrzymywanymi z układów wstępnego kondycjonowania występujących na początku torów pomiarowych. Wymaga to zarówno dysponowania szczegółowym jednolitym opisem modeli matematycznych i właściwości metrologicznych wieloparametrowych obiektów pomiarowych, jak i opracowania układów odpowiednich do kondycjonowania sygnałów pochodzących od skojarzonych ze sobą parametrów wielokońcówkowych immitancyjnych czujników i ich zespołów, coraz bardziej rozpowszechnionych w zastosowaniach. Próbę odpowiedzi na dużą część tego zapotrzebowania, w zamyśle autora, ma zawierać niniejsza praca.

1. GENEZA TEMATYKI PRACY I ZALEŻNOŚCI PODSTAWOWE

1.1. Wprowadzenie

W dotychczasowych, prostych oraz inteligentnych przetwornikach, przyrządach i systemach do pomiarów wieloparametrowych dominują rozwiązania zawierające tory przetwarzające selektywną informację pomiarową o pojedynczych wielkościach. Wpływy innych wielkości minimalizuje się na drodze konstrukcyjnej i układowej. Przy pomiarach pośrednich często występują mesurandy w postaci parametrów ze sobą sprzężonych zarówno w obiekcie badanym, jak i w układzie pomiarowym wskutek oddziaływania wielkości wpływających równocześnie na te parametry i związków wynikających z praw Kirchoffa. Rzeczywiste obiekty, czujniki i układy pomiarowe są rozciągnięte przestrzennie oraz zazwyczaj dostępne z zewnątrz tylko w określonych punktach pomiarowych lub na zaciskach. Dla wielu wielkości oddziałujących w postaci pól o różnych rozkładach przestrzennych oraz dla niejednorodnych rozkładów właściwości obiektów i czujników pomiarowych, na ich zaciskach wyjściowych można otrzymać ten sam zbiór parametrów wyjściowych niosących informację użyteczną, a więc i te same sygnały wyjściowe. Zazwyczaj nie ma możliwości, aby w sposób wystarczający dla celów metrologicznych opisać lub wytworzyć eksperymentalnie różne warianty takich rozkładów, które mogą wystąpić w praktyce, nawet tylko dla zagadnień statycznych, tak aby było możliwe odtworzenie ich po stronie cyfrowej z wymaganą dokładnością. Dla pól równomiernych oraz liniowych obiektów i czujników o liniowej charakterystyce, jednorodnych lub punktowych, zależności stają się jednoznaczne. W innych wypadkach określa się parametry i oddziaływania uśrednione oraz ich niepewności. Do opisu stosuje się zwykle modele uproszczone – o parametrach skupionych zarówno deterministyczne o znanej lub zastępczej strukturze, jak i uzyskiwane poprzez uczenie sieci neuronowych. Ponadto, w niektórych zadaniach pomiarowych np. w diagnostyce, sygnały wielkości mierzonych bywają znacznie mniejsze od niepożądanych wpływów innych wielkości. Istotną więc rolę mają tu nadal te wejściowe układy analogowe kondycjonowania sygnałów, które nie przekazują dalej niepożądaną lub nadmiarową informacji. Taką rolę pełnią też impedancyjne układy 4T, omawiane w tekście szczegółowo wraz z propozycjami nowych rozwiązań i zastosowań.

Istotę tych kilku ogólnych stwierdzeń rozwinięto w następnych punktach tego rozdziału i ponadto w dwu pierwszych punktach Dodatku 1 poświęconych omówieniu współczesnych zadań pomiarów impedancji i układów kondycjonowania sygnałów.

1.2. Rys historyczny, geneza tematu i charakterystyka stanu wiedzy o pomiarowych układach 4T

Stosowanie układów 4T w pomiarach ma już przeszło 170-letnią bogatą historię. Dotyczy to przede wszystkim podstawowego ich rodzaju – mostków klasycznych. Ideę czteroramiennego symetrycznego mostka rezystancyjnego prądu stałego podał Christi już w 1833 roku. Wiąże się go jednak z nazwiskiem Wheatstone'a (wynalazcy telegrafu elektromagnetycznego na pięć lat przed Morsesem), który w 1844 r. zastosował ten mostek do porównywania rezystorów o zbliżonych wartościach. Następnie, w 1848 r. jeden z braci W. W. Siemensów przystosował ten układ do pomiarów rezystancji o znacznie różniących się wartościach. Później kolejno powstawały następne układy, w tym: mostek Thompsona (1862) do pomiarów małych czterozaciskowych rezystancji, mostek Maxwella (1865) i inne mostki do pomiarów indukcyjności i pojemności z galwanometrem balistycznym jako detektorem stanu równowagi oraz mostek Wiena (1891) do pomiarów pojemności, pracujący po raz pierwszy przy prądzie przemiennym o jednej częstotliwości. W dwudziestym wieku pojawiło się wiele różnych rozwiązań mostków pasywnych, w tym transformatorowe, a następnie układy mostkowe aktywne o źródłach przełączanych, lub sterowanych i z przetwarzaniem. Początkowo układy te równoważono ręcznie, a następnie automatycznie, analogowo i cyfrowo. Więcej informacji o historii rozwoju mostków pomiarowych zawierają m.in. publikacje [1, 6, 7, 33/I, 46, 58]. Wybrane wcześniejsze polskie prace z tej dziedziny zestawiono w części B2.1 Bibliografii, a ich krótkie omówienie zawiera punkt D1.3 Dodatku 1.

Zrównoważone układy pasywne i aktywne o strukturze mostka stosuje się powszechnie w pomiarach statycznych składowych immitancji oraz w pomiarach pośrednich różnych pojedynczych wielkości, najczęściej przy prądzie stałym za pomocą czujników rezystancyjnych i konduktancyjnych. Natomiast przy rejestracji zmian i przede wszystkim w pomiarach dynamicznych od lat używa się głównie mostków niewymagających procedury równoważenia, nazywanych niezrównoważonymi lub odchyłowymi. Zyskały one istotnie na znaczeniu po opracowaniu produkcji scalonych półprzewodnikowych wzmacniaczy pomiarowych prądu stałego oraz obciążalnych, wysokostabilnych źródeł napięcia i prądu. Nośnikiem informacji pomiarowej, zależnej od kombinacji przyrostów immitancji ramion mostka względem stanu równowagi, jest bądź jego sygnał wyjściowy w postaci napięcia lub prądu przy stabilizowanym zasilaniu, bądź stosunek tego sygnału do wartości prądu lub napięcia niestabilizowanego źródła zasilania (pomiaru ilorazu sygnałów). Mostki te są obecnie niewiele mniej dokładne niż zrównoważone.

Na temat mostków i ich zastosowań powstała bardzo bogata, w praktyce niepoliczalna literatura, w tym monografie [1, 2, 5, 6, 59]. Ta ogromna wiedza

jest nadal jeszcze rozwijana i dostosowywana do ciągle pojawiających nowych możliwości technologicznych, gdyż układy mostkowe są niezastępowalne w wielu różnych dziedzinach techniki pomiarowej. Nowe rozwiązania pojawiają się dość rzadko, częściej są to różne kolejne, wąsko specjalizowane zastosowania. Pomimo to autor wpadł na trop i wyodrębnił szeroką klasę nierozwiązywanych dotąd zagadnień dotyczących zastosowania układów 4T w równoczesnych pomiarach kilku parametrów ze sobą sprzężonych. Odkrył też nadające się do tego celu mostki niekonwencjonalnie dwuprządowo zasilane o dwu różnych wyjściach. Zagadnienia te wymagały opracowania jednolitych podstaw teoretycznych układów dotychczasowych i nowo odkrytych dla ich zastosowań w pomiarach wieloparametrowych. Stanowi to trzon problematyki tej monografii.

Stosunkowo niedawno pojawiły się w technice pomiarowej nierozłączalne czujniki czterozaciskowe, na przykład mostkowe przetworniki tensometryczne, mostki magnetorezystorowe, hallotrony i inne czujniki galwanomagnetyczne. Są one dostępne samodzielnie i również jako scalone z różnymi układami kondycjonowania sygnałów, pasywnymi, aktywnymi i z przetwarzaniem analogowo-cyfrowym. Ich schemat zastępczy, poza wielobokiem zupełnym o immitancjach wewnętrznych zależnych od kilku wielkości może zawierać sterowane i nieodwracalne elementy, obwodu. Dotychczas rozwiązywano szczegółowo w praktyce zagadnienia dotyczące ich zastosowań w selektywnych pomiarach jednej wielkości. Ostatnio pojawiły się też wstępne informacje o rozwiązaniach technologicznych czujników umożliwiających w jednej strukturze fizycznej wykorzystywać różne zjawiska do pomiarów kilku wielkości. Wiele problemów układowych kondycjonowania sygnałów w immitancyjnych pomiarach wieloparametrowych nie jest jeszcze wystarczająco opanowanych. Na inne trzeba spojrzeć syntetycznie w sposób uogólniający i z nowego punktu widzenia – równoczesnych pomiarów kilku wielkości ze sobą skojarzonych. Temu celowi ma służyć poniższe opracowanie.

Do rozwiązywania zagadnień analizy i syntezy układów elektrycznych, w tym pomiarowych, powszechnie stosuje się schematy zastępcze. Ich zaletą jest to, że nie wymagają każdorazowego wnikania w szczegóły wewnętrzne i niedoskonałości budowy elementów, opisując je poprzez zbiór charakterystyk i parametrów na zaciskach zewnętrznych. Analiza właściwości metrologicznych czujników i ich układów prowadzona na potrzeby konstruowania i użytkowania przetworników, przyrządów i systemów pomiarowych, w szczególności tzw. inteligentnych (smart), wymaga z zasady znacznie głębszego, niż przy innych aplikacjach teorii obwodów, wniknięcia w zależności podstawowe i zjawiska pasożytnicze.

We współczesnej technice pomiarowej układy 4T, a w tym mostki 4R i układy hallotronowe zdobyły obszary o pozycji utrwalonej i niezastępowalnej w dającej się przewidywać przyszłości. Ich rola stała się obecnie inna i znacznie

szersza niż poprzednio. Poza zastosowaniami w autonomicznych przyrządach pomiarowych, pasywne i aktywne układy 4T zawierające strukturę w postaci mostka występują też w:

- schematach zastępczych mierzonych obiektów przestrzennie ciągłych lub dyskretnych, w tym rozbudowanych układów elektrycznych, o wnętrzu dostępnym pośrednio tylko z kilku końcówek, a podlegających testowaniu, monitoringowi i diagnostyce
- schematach zastępczych cztero- i wielokońcówkowych czujników i ich nierozłączalnych zestawów, w tym półprzewodnikowych i scalonych
- członach wejściowych układów do kondycjonowania sygnałów różnych czujników impedancyjnych stosowanych w autonomicznych przyrządach i przetwornikach pomiarowych oraz w kartach pomiarowych systemów komputerowych. (Zazwyczaj są one bezpośrednio scalone z przetwornikami analogowo-cyfrowymi.)
- innych samodzielnych modułach pomiarowych.

Zastosowania te są więc bardzo zróżnicowane. Ich opisy dotyczą w większości pomiarów jednej wielkości (akronim angielski 1D – one Dimension) lub badań jej wpływu na immitancje układu. Równoczesne pomiary lub badania wpływu kilku wielkości (ogólnie – nD) oddziałujących równocześnie na parametry układu i powodujących duże przyrosty, są dość słabo rozwinięte. Tymczasem, ze względu na powszechny związek zjawisk, w zasadzie wszystkie pomiary powinny być traktowane jako wieloparametrowe. To ogromne utrudnienie omija się w praktyce, minimalizując wpływy wielkości w danych pomiarach niepożądanych poprzez odpowiednią konstrukcję przyrządów (np. pomiary różnicowe, ekranowanie, filtrację, detekcję fazoczuła) i stabilizację warunków pomiaru. Oddziaływania szcążkowe szacuje się poprzez dodatkowe błędy systematyczne i niepewności pomiarowe. Większe wpływy kompensuje się lub koryguje na różne sposoby. Pojawia się jednak coraz więcej takich zadań pomiarowych, w których sygnały pochodzą od kilku wielkości mierzonych i są ze sobą porównywalne, a nawet bywają znacznie mniejsze niż wpływy wielkości niepożądanych, np. w diagnostyce. Właściwym wyjściem są wówczas odpowiednio poprowadzone pośrednie pomiary wieloparametrowe.

W sposób naturalny wyłania się pytanie: czy pomiarów tych nie można już rozwiązywać na łatwiejszej w realizacji drodze tylko czysto cyfrowej? Czy więc ma jeszcze uzasadnienie praktyczne, aby nadal doskonalić i rozwijać też układy analogowe? Odpowiedź jest jednoznaczna: tak, gdyż układy te są nadal w olbrzymiej większości wypadków nie do zastąpienia. Wynika to stąd, że nie tylko badane obiekty i ich wielkości mierzone (mesurandy), ale i czujniki są analogowe i na ogół nieselektywne. Również równoczesne oddziaływania kilku wielkości na parametry układu są niejednakowe, nie w pełni przewidywalne zarówno w czasie, jak i co do ich rozkładu przestrzennego w obszarze obiektu

objętego pomiarami oraz we wnętrzu i otoczeniu czujników, ze względu na skończone ich wymiary. Ponadto wiele z tych oddziaływań może mieć nieznany lub zbyt skomplikowany opis. W takiej sytuacji brak jest danych do opracowania odpowiednich procedur korekcyjnych po stronie cyfrowej. Duże uproszczenia wprowadza tu stosowanie różnych analogowych układów różnicowych i mostkowych oraz układów do kompensacji zjawisk pasożytniczych, korekcji charakterystyk, symetryzacji i stabilizacji warunków pracy, często umieszczanych tuż przy czujnikach, lub z nimi zintegrowanych. Do takich celów można wykorzystywać zarówno mostki klasyczne, jak i zaproponowane przez autora nowe mostki o niekonwencjonalnym dwuprądowym zasilaniu i wyjściach z obu przekątnych.

Zasady działania i właściwości mostków klasycznych i dwuprądowych z punktu widzenia zastosowania ich do pomiarów kilku parametrów skojarzonych w układzie autor omówił w kilkunastu publikacjach [27 – 47] w oryginalnym i jednolitym „układowym” ujęciu. Przedstawiał i zanalizował w nich możliwości pomiarów dwu (2D) i więcej parametrów mostkami każdego rodzaju z osobna oraz mostkami obu rodzajów łącznie.

W każdym z zastosowań układów 4T wyznaczenie zmian wartości jego parametrów lub na ich podstawie wielkości mierzonych, wymaga znajomości równań całego układu zarówno w postaci szczegółowej, jak i odpowiednio uogólnionych, które wskazywałyby, jak uzyskać najlepsze właściwości metrologiczne. Z bardzo obszernej literatury traktującej o mostkach i ich zastosowaniach zestawiono w bibliografii tylko wybrane pozycje [1 – 21, 58 – 72], w tym podstawowe monografie i podręczniki [1 – 13, 15, 17, 20]. Omawiano w nich zazwyczaj różne szczególne rodzaje pracy mostków, w tym też takie, które mają już małe znaczenie praktyczne. Na przykład, dużo uwagi poświęcano takiemu doborowi rezystancji mostków zasilanych napięciowo, aby uzyskać maksymalną czułość lub moc dostarczaną do odbiornika w postaci przyrządu analogowego, przy dopuszczalnym błędzie temperaturowym, tłumieniu galwanometru, lub aby zapewnić przebieg charakterystyki mostków niezrównoważonych przez określone dwie lub trzy wartości przyrostów jednej z rezystancji mostka, np. dla termistorów [71, 72].

Zarówno nowe, jak i dotychczasowe zadania pomiarowych układów mostkowych realizuje się obecnie zazwyczaj inaczej niż poprzednio. Dzięki scalonym wzmacniaczom pomiarowym bez trudu uzyskuje się na wejściu i wyjściu niemal idealnie prądową lub napięciową współpracę mostka z dołączonymi do niego układami oraz pożądaną wartość zastępczych rezystancji wejściowych i wyjściowych. Niezbędne dostrojenia układu związane z wymianą czujników, zmianą zakresu lub używanych jednostek oraz kształtowaniem przebiegu jego charakterystyki w funkcji pojedynczej wielkości mierzonej przeprowadza się już po przetworzeniu sygnałów wyjściowych w postaci cyfrową, uwzględniając parametry czujnika i mostka łącznie. W takie

funkcje są wyposażone bardziej zaawansowane technicznie, głównie tzw. inteligentne przyrządy i przetworniki pomiarowe z konwencjonalnym układem mostkowym na wejściu. Dostrajanie przeprowadza się zarówno z lokalnej klawiatury, jak i zdalnie z przenośnego, lub stacjonarnego komputera, czy też specjalnego komunikatora. Wpływ różnic w wartościach parametrów czujników eliminuje się poprzez cyfrowe wprowadzanie danych dostarczonych przez producenta lub otrzymanych z pomiarów kalibracyjnych.

Z wcześniejszych prac nadal obecnie użyteczny może być jedynie dość ogólny opis mostków niezrównoważonych o przyrostach impedancji w jednym lub dwu ich ramionach zawarty w podręczniku M. I. Levina [3], a oparty na impedancjach skrośnych łączących dwie gałęzie układu. To podejście stosowane częściowo już we wcześniejszej literaturze rosyjskojęzycznej, np. w [60], nie ma odbicia w literaturze zachodniej.

Opisano też w literaturze bardzo rozbudowane układy do pomiaru elementów macierzy admitancyjnej sieci wielokońcówkowych, ale oparte na dość trudnych w realizacji zrównoważonych mostkach transformatorowych [8]. W tomografii impedancyjnej metodą techniczną dokonuje się pomiarów kolejnych napięć na wielu elektrodach przy przełączaniu wymuszonego prądu i na ich podstawie odtwarza się cyfrowo zmiany impedancji lub przewodności w siatce modelującej rozkład pola. Są to pomiary niezbyt precyzyjne, służące zazwyczaj celom diagnostycznym, a nie zaś precyzyjnemu wyznaczaniu małych zmian parametrów układu i wartości kilku wielkości wpływających.

Równoczesne pomiary wielu wielkości, np. w badaniach i w przemyśle, wykonuje się dotąd niemal wyłącznie wtedy, gdy można zastosować osobne czujniki selektywne z rozdzielnymi lub multipleksowanymi torami pomiarowymi. Pomiary pośrednie wieloparametrowe wielkości wspólnie oddziałujących na obiekt badany lub na czujniki, ze względu na różnorodność możliwości, nie są jeszcze wystarczająco opanowane.

Tymczasem można też pośrednio mierzyć równocześnie w układzie tyle zmian parametrów lub wielkości na niego wpływających, ile uzyska się sygnałów różnie zależnych od tych zmian. Równania opisujące te powiązane ze sobą sygnały powinny mieć jednak rozwiązania jednoznaczne lub możliwe do wyselekcjonowania ze względu na ich realizację fizyczną [54 – 56]. Pomiary równoczesnych zmian kilku rezystancji w jednym układzie mostkowym, lub kilku wielkości jednym mostkiem z kilkuparametrowymi czujnikami, są istotnym rozszerzeniem możliwości metrologicznych, ale wymagają odpowiedniego opisu teoretycznego. Do szczegółowej analizy zagadnień występujących współcześnie przy zastosowaniach różnych układów mostka niezrównoważonego niezbędne jest stosowanie jego pełnego opisu teoretycznego bez uproszczeń zakładających wstępną regulację zera lub idealne spełnienie stanu równowagi.

Przy istniejących możliwościach techniki pomiarowej dotychczasowe opisy mostka w niektórych sytuacjach są niewystarczające. Między innymi nie obejmują one w syntetycznej formie opisu pełnych charakterystyk wszystkich parametrów roboczych na zaciskach mostka niezrównoważonego o dowolnym zasilaniu, obciążeniu i przy dużych przyrostach rezystancji lub konduktancji kilku jego ramion. Również i analizę dokładności pomiarów mostkami niezrównoważonymi przeprowadzano dotąd bądź tylko dla napięcia wyjściowego przy małych przyrostach, bądź dla pomiarów tylko jednej wielkości w sposób uproszczony [18, 19]. Autor nie spotkał też w literaturze szczegółowego omówienia zasad wymienności czujników, w tym bez konieczności regulacji elementów samego mostka. Wykracza to poza zakres pracy, gdyż wymaga znajomości rozrzutu poszczególnych parametrów czujników od określonego producenta, ale podane tu opisy umożliwiają rozwiązanie i tego zagadnienia.

1.3. Zadania i istota pomiarów wieloparametrowych (nD)

Pomiary wieloparametrowe (*multivariable measurements*) są stosowane coraz częściej i służą do równoczesnego wyznaczenia wartości lub składowych kilku, ogólnie n wielkości, zarówno w jednym, jak i w różnych miejscach obiektu badanego. Oznacza się je symbolem nD (n -Dimensional). Przy ich realizacji występują następujące rodzaje zadań:

- przetwarzanie wielkości mierzonych w odzwierciedlające je zmiany parametrów jednego czujnika lub układu kilku czujników włączonych na wejściu przetworników pomiarowych
- wyznaczenie wartości elementów wewnętrznych schematu zastępczego układu badanego lub układu wyjściowego zawierającego czujniki, na podstawie pomiarów parametrów tego układu na dostępnych zewnętrznie jego zaciskach
- odtworzenie wielkości mierzonych poprzez przekształcenia odwrotne oparte na wyznaczonych wartościach tych elementów
- oszacowanie miar dokładności pomiarów i przetworzeń sygnałów.

W przetwornikach i komputerowych systemach pomiarowych zadania te często występują razem, np. w pomiarach pośrednich za pomocą czujników. Drugie zadanie występuje również samodzielnie – przy identyfikacji i diagnostyce zmian parametrów schematu zastępczego różnych układów i urządzeń elektrycznych. Zadania powyższe wynikają stąd, że jedynie dla nielicznych wielkości istnieją czujniki selektywne, którymi można bezpośrednio zmierzyć poszczególne wielkości. Trzeba wówczas wykorzystać taki zespół czujników, którego parametry zależą w różny sposób od kilku wielkości. Ponadto, wiele z badanych lub diagnozowanych układów, czujniki zintegrowane oraz podzespoły wejściowe toru pomiarowego nie dają się rozłączać, a nawet nie ma bezpośredniego dostępu do elementów wewnętrznej

struktury ich schematu zastępczego. Wówczas, na zewnętrznych zaciskach trzeba wykonać pomiary kilku takich parametrów, które są różnymi funkcjami parametrów wewnętrznych i umożliwiają znalezienie ich wartości. Takie zadania występują na przykład w diagnostyce parametrycznej układów analogowych, przy badaniu zmian właściwości kierunkowych materiałów różnymi układami elektrod oraz przy pomiarze składowych rozkładów pól zespołem kilku czujników, w tym również sprzężonych ze sobą konstrukcyjnie. W obu wypadkach z układu wejściowego trzeba uzyskać i zmierzyć tyle sygnałów, ile jest wielkości niezależnych, które wpływają na jego parametry w różny sposób, a następnie dokonać na ich zbiorze przekształcenia odwrotnego, to jest rozwiązać, w urządzeniu pomiarowym lub poza nim, układ równań opisujących istniejące zależności. Tak więc pomiary wieloparametrowe są zazwyczaj pomiarami pośrednimi. Można to opisać w sposób ogólny dla stanu statycznego następującym wzorem:

$$\mathbf{R} = \mathbf{F} [\mathbf{r} (\mathbf{X}), \mathbf{Z}] \quad (1.1)^1$$

gdzie: $\mathbf{R} = [\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_i, \dots, \mathbf{R}_n]^T$ – macierz kolumnowa parametrów mierzonych bezpośrednio w układzie na jego zaciskach i sprzężonych z jego parametrami wewnętrznymi \mathbf{r}

$\mathbf{r} = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_k, \dots, \mathbf{r}_o]^T$ – macierz kolumnowa parametrów wewnętrznych układu zależnych od zbioru mierzonych wielkości \mathbf{X}

\mathbf{F} – macierz operatorów, ogólnie nieliniowych, na parametrach \mathbf{r} zależnych od wielkości mierzonych \mathbf{X} i zakłóceń \mathbf{Z}

$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_i, \dots, \mathbf{X}_m]^T$ – macierz kolumnowa niezależnych wielkości \mathbf{X}_i mierzonych pośrednio

$\mathbf{Z} = [\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_l, \dots, \mathbf{Z}_p]^T$ – inne wielkości oddziałujące na parametry czujników i innych elementów układu, traktowane jako zakłócające, znane lub nieznanne.

Warunkiem koniecznym przy pomiarach nD (n wielkości) jest, aby co najmniej n zależności $\mathbf{R}_i(\mathbf{X})$ różniło się od siebie, a ponadto liczby elementów m i o zbiorów \mathbf{R} i \mathbf{r} muszą być co najmniej równe liczbie n mierzonych wielkości \mathbf{X}_i ; tj. spełniać warunki: $m \geq n$ oraz $o \geq n$. Wartości wielkości \mathbf{X} mierzonych pośrednio otrzymuje się z przekształceń odwrotnych wielkości \mathbf{R} zmierzonych na końcówkach układu:

¹ Wzory, rysunki i tabele są poprzedzone numerem każdego rozdziału i numerowane kolejno od jego początku.

$$\mathbf{X} = \mathbf{r}^{-1} \left[\mathbf{F}^{-1}(\mathbf{R}), \mathbf{Z} \right] \Big|_{\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_T} \quad (1.1a)$$

gdzie \mathbf{Z}_T – wartości wielkości zakłócających w trakcie pomiarów. Dla warunków odniesienia $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_0$

Gdy z zacisków mierzy się tylko zbiór wewnętrznych parametrów układu \mathbf{r} , np. w celu identyfikacji elementów schematu zastępczego lub zmian ich wartości do celów testowania, diagnostyki czy też wymiany, to wówczas $\mathbf{r}(\mathbf{X}) = \mathbf{1}$ i otrzymuje się

$$\mathbf{X} = \mathbf{r} = \mathbf{F}^{-1}(\mathbf{R}) \Big|_{\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_T} \quad (1.1b)$$

Rozwiązania równań (1.1a,b) muszą być jednoznaczne lub dające się wyselekcjonować ze względu na możliwość ich fizycznej realizacji. Jeśli funkcja wielowymiarowa \mathbf{F} jest liniowa, to

$$\mathbf{R}(X_j) = \mathbf{K} \mathbf{X} \quad (1.1c)$$

Zaś przekształcenie odwrotne jest następujące:

$$\mathbf{X} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{R} \quad (1.1d)$$

gdzie: \mathbf{K} – macierz (nieosobliwa) składająca się ze współczynników, które są funkcjami wartości elementów układu.

Obok wartości X_j , otrzymanych z uwzględnieniem poprawek, wyniki pomiarów muszą też zawierać oszacowania ich miar niedokładności bądź w postaci granic przedziałów błędów systematycznych i błędów przypadkowych, bądź niepewności pomiarowych o założonym prawdopodobieństwie. Z zależności (1.1), na podstawie rachunku błędów, wynika związek pomiędzy macierzami miar dokładności zbiorów wielkości \mathbf{R} , \mathbf{X} , \mathbf{Z} oznaczonymi przez $\delta_{\mathbf{R}}$, $\delta_{\mathbf{X}}$ i $\delta_{\mathbf{Z}}$, zapisany ogólnie jako

$$\delta_{\mathbf{R}} = \mathbf{F}_1(\delta_{\mathbf{X}}, \delta_{\mathbf{Z}}) \quad (1.2)$$

Przy małych wartościach przyrostów, za pomocą różniczki zupełnej otrzymuje się dla przyrostów bezwzględnych liniowe funkcje \mathbf{F}_1 o postaciach

$$\Delta R_i = \sum_{j=1}^m W_{ij} \Delta X_j + \sum_{l=1}^p W_{il} \Delta Z_l$$

gdzie

$$W_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial X_j}, \quad W_{il} = \frac{\partial R_i}{\partial Z_l}$$

oraz dla przyrostów względnych

$$\delta R_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} \delta X_j + \sum_{l=1}^p w_{il} \delta Z_l$$

ze współczynnikami wynoszącymi odpowiednio:

$$w_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial X_j} \frac{X_j}{R_i}, \quad w_{il} = \frac{\partial R_i}{\partial Z_l} \frac{Z_l}{R_i}$$

Związki pomiędzy przyrostami są podstawą do określenia różnych miar dokładności wielkości mierzonych. Na podstawie teorii błędów można je podać bądź w postaci błędów granicznych systematycznych i przypadkowych bądź jako rozszerzone niepewności pomiarowe.

Jako wyniki bezpośrednich pomiarów otrzymuje się elementy macierzy R wraz z oszacowaniami ich niedokładności δ_R . Macierz miar dokładności δ_X uzyskuje się z przekształcenia odwrotnego wzoru (1.2):

$$\delta_X = F_1^{-1}(\delta_R, \delta_Z) \quad (1.2a)$$

gdzie: F_1^{-1} - zbiór funkcji odwrotnych względem operatorów F_1 wiążących błędy δ_R i δ_Z .

Zależności te można też uzyskać za pomocą różniczki zupełnej bezpośrednio z zależności (1.1a). W warunkach odniesienia wielkości zakłócające $Z = Z_0$ oraz $\delta_Z = 0$. Wówczas otrzymuje się błędy podstawowe pomiarów wieloparametrowych jako

$$\delta \mathbf{X} = \mathbf{F}_1^{-1}(\delta \mathbf{R}) \Big|_{\mathbf{Z}=\mathbf{Z}_0} \quad (1.2b)$$

Gdy operatory \mathbf{F}_1 są liniowe, wówczas:

$$\delta \mathbf{X} = \mathbf{K}_1^{-1} \delta \mathbf{R} \quad (1.2c)$$

gdzie: \mathbf{K}_1 – macierz współczynników (nieosobliwa).

Dla błędów bezwzględnych elementami macierzy \mathbf{K}_1 są współczynniki

$$k_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial X_j}.$$

Zarówno równoczesne pomiary kilku parametrów, jak i przetwarzanie sygnałów są obarczone niedokładnościami i wymagają wnikliwej analizy metrologicznej oraz wyznaczenia błędów i niepewności pomiarowych. Elementy równań macierzowych (1.2a,b) dla różnych ocen niedokładności mostkowych pomiarów wieloparametrowych otrzymuje się bezpośrednio ze wzorów (1.2) lub (1.2a), stosując rachunek błędów. Zagadnienia te omawia się w rozdziale 8.

1.4. Pomiary pośrednie dwu wielkości (2D) czujnikami rezystancyjnymi

Zasady pomiarów wieloparametrowych prześledzimy na przykładzie pomiarów pośrednich dwu wielkości X_1 , X_2 czujnikami immitancyjnymi, których parametry są sprzężone, gdyż zmieniają się pod wpływem obu tych wielkości. Przeprowadza się je wówczas, gdy wielkości te w znany sposób wpływają równocześnie co najmniej na dwa parametry jednego czujnika bądź na jeden z parametrów dwu lub więcej czujników. Parametry te można zmierzyć bezpośrednio lub pośrednio w układzie pomiarowym. Aby z pomiarów parametrów wyznaczyć wartości wielkości pierwotnych, jak już wspomniano, układ równań powinien mieć rozwiązania bądź jednoznaczne, bądź oczywiste przy ich wyborze ze względu na realizację fizyczną, np. dodatnie rezystancje. Tak więc jedna z wielkości wpływających X_1 , X_2 musi oddziaływać inaczej niż druga przynajmniej na jeden ze zmieniających się parametrów. Zmiany każdego z mierzonych w układzie parametrów bardziej ogólnie określają ich przyrosty względne ε_1 , ε_2 (niż bezwzględne Δ_1 , Δ_2), wyznaczone względem wartości początkowych tych parametrów. Dotyczy to zarówno przyrostów dwu rezystancji R_1 , R_2 (lub konduktancji) czujników immitancyjnych, jak i przyrostów wartości parametrów na zewnętrznych końcówkach układu o określonym schemacie zastępczym. Zmiany wielkości X_1 , X_2 opisuje się również przez ich przyrosty x_1 , x_2 od wartości stanu

początkowego. Wpływy mogą być opisywane różnymi funkcjami. Analiza wszystkich, w tym nieliniowych zależności, które występują w praktyce pomiarowej, nie jest możliwa do wykonania.

Aby przybliżyć zagadnienie, rozpatrzmy zasadę pomiarów w dość częstej sytuacji, gdy każdy z przyrostów ε_1 , ε_2 ma takie dwie składowe, z których każda zależy już tylko od jednej wielkości wpływającej. Wówczas:

$$\varepsilon_1(x_1, x_2) = \varepsilon'_1(x_1) + \varepsilon''_1(x_2) \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_2(x_1, x_2) = \varepsilon'_2(x_1) + \varepsilon''_2(x_2)$$

Po prawej stronie układu równań (1.3) występują aż cztery różne składowe. Znalezienie x_1 , x_2 będzie więc wtedy możliwe, gdy składowe te będą powiązane jeszcze dwoma innymi znanymi zależnościami. Załóżmy na przykład, że zależności te są liniowe, czyli że:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon'(x_1) \\ \varepsilon''(x_2) \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

lub w postaci rozwiniętej dla składowych obu przyrostów:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_1(x_1) &= k_{11} \varepsilon'(x_1); & \varepsilon'_1(x_2) &= k_{12} \varepsilon''(x_2) \\ \varepsilon'_2(x_1) &= k_{21} \varepsilon'(x_1); & \varepsilon'_2(x_2) &= k_{22} \varepsilon''(x_2) \end{aligned} \quad (1.4a)$$

Przekształcenie odwrotne jest następujące:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon'(x_1) \\ \varepsilon''(x_2) \end{bmatrix} = \frac{1}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} \begin{bmatrix} k_{22} & -k_{21} \\ -k_{12} & k_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} \quad (1.4b)$$

Przyrosty cząstkowe $\varepsilon'(x_1)$ oraz $\varepsilon''(x_2)$ składowych mogą być zarówno liniowymi, jak i nieliniowymi funkcjami przyrostów x_1 oraz x_2 wielkości mierzonych. Przy różnych wartościach współczynników k_{ij} układ równań (1.4) dla przyrostów względnych opisuje zarówno liniowe zależności zmian parametrów układu od wielkości wpływających (dodawanie, odejmowanie z różnymi współczynnikami), jak i niektóre nieliniowe, gdyż suma niezbyt dużych przyrostów względnych kilku wielkości odzwierciedla mnożenie tych wielkości, a różnica – ich dzielenie.

Rozpatrzmy trzy szczególne rodzaje pary czujników:

1°. Oba czujniki są selektywne: $\varepsilon_1 = f_1(x_1)$, $\varepsilon_2 = f_2(x_2)$,

wówczas $k_{12} = 0$, $k_{21} = 0$, a z otrzymanych wartości ε_1 , ε_2 wyznacza się bezpośrednio:

$$x_1 = f_1^{-1}(\varepsilon_1) \quad \text{oraz} \quad x_2 = f_2^{-1}(\varepsilon_2).$$

2°. Tylko jeden z czujników jest selektywny, np. $\varepsilon_1 = F(x_1, x_2)$, $\varepsilon_2 = f_2(x_2)$,

wówczas

$$x_1 = F^{-1}[\varepsilon_1, f_2^{-1}(\varepsilon_2)] \quad \text{oraz} \quad x_2 = f_2^{-1}(\varepsilon_2).$$

Niech np.: $k_{11} = k_{22} = 1$, $k_{12} = \pm 1$, $k_{21} = 0$, czyli:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon'(x_1) \pm \varepsilon''(x_2) \quad \text{oraz} \quad \varepsilon_2 = \varepsilon''(x_2),$$

a stąd:

$$\varepsilon' = \varepsilon_1(x_1) \pm \varepsilon''(x_2), \quad \text{oraz} \quad \varepsilon'' = \varepsilon_2(x_2)$$

3°. Wielkość x_1 jednakowo wpływa na oba przyrosty ε_1 , ε_2 , zaś wpływy wielkości x_2 są tej samej wartości, lecz przeciwnego znaku, czyli: $k_{11} = k_{21} = k_{22} = +1$, $k_{12} = -1$ oraz

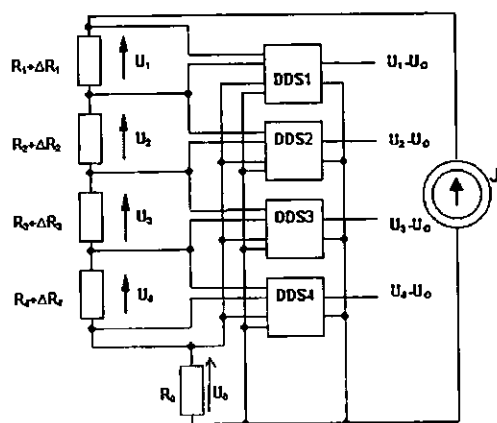
$$\varepsilon'_1(x_1) = \varepsilon'_2(x_1) \equiv \varepsilon', \quad \varepsilon''_2(x_2) = -\varepsilon''_1(x_2) \equiv \varepsilon''$$

wówczas

$$\varepsilon' = 0,5(\varepsilon_1 + \varepsilon_2); \quad \text{oraz} \quad \varepsilon'' = 0,5(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

Dla wszystkich powyższych rodzajów pracy czujników, po znalezieniu przyrostów ε_1 , ε_2 można wyznaczyć ich składowe $\varepsilon'(x_1)$, $\varepsilon''(x_2)$, a z nich przyrosty x_1 , x_2 wielkości mierzonych.

Pomiary przyrostów dwu lub więcej parametrów i odtwarzanie wielkości mierzonych na podstawie powyżej omówionych zależności można przeprowadzać w różnych układach pomiarowych, różnicowych i sumujących. Istnieje kilka możliwości pomiarów przyrostów rezystancji. Rezystancje podlegające zmianom można na przykład wraz ze stałą rezystancją odniesienia połączyć szeregowo, zasilić stabilizowanym prądem oraz bardzo precyzyjnie mierzyć cyfrowo, zapamiętywać i odpowiednio dalej przetwarzać wszystkie kolejne spadki napięć. Przy dwu tylko rezystancjach zmiennych, dla uzyskania pojedynczego wyniku trzeba wykorzystać co najmniej sześć pomiarów w tym trzy dla stanu początkowego. Liczba pomiarów i przetworzeń przyrasta wraz z każdą dodatkową zmienną rezystancją. Nie jest to wygodna metoda nawet przy jej automatyzacji, szczególnie w pomiarach dynamicznych przy szybko zmieniających się wielkościach, i nadaje się do stosowania raczej tylko w warunkach laboratoryjnych.



Rys. 1.1. Prądowa pętla Andersona (NASA) [16]
 DDSi – dwuwejściowe układy
 różnicowe mierzące przyrosty napięć
 czujników

Fig. 1.1. Current Anderson loop [16]
 DDSi - double inputs differential circuits
 measuring voltage increments of sensors

Można też stosować wyspecjalizowany układ – tzw. prądową pętlę Andersona [16] – rys. 1.1. Mierzy ona i przetwarza dalej analogowo wszystkie przyrosty napięć, ale muszą być spełnione pewne dodatkowe wymagania, w tym: rezystancje początkowe czujników takie jak rezystancja odniesienia i zasilane tym samym prądem ograniczonym przez najmniejszą wartość dopuszczalnej mocy, rozłączanie czujników połączonych np. w mostek przynajmniej w jednym punkcie, konieczność użycia aż 6-7 przewodów doprowadzających oraz wielu dokładnych wzmacniaczy różnicowych o tzw. „pływających” wejściach.

Przyrosty względne składowych immitancji wielu czujników, np. rezystancji tensometrów mogą być bardzo małe. Jeśli wynik zależy od bardzo małej różnicy mierzonych dwu dużych napięć, to może on być bardzo niedokładny, a błędów nie ma jak wyeliminować na bieżąco i w prosty sposób. Wówczas przy pomiarach jednoparametrowych mostki klasyczne mają nadal szereg znanych zalet w stosunku do bezpośrednich pomiarów obu napięć, w tym bardzo dużą stabilność zera opartą na stabilności elementów pasywnych. Dla małych względnych przyrostów rezystancji realizują one też na bieżąco sygnał zależny liniowo od sumy i różnicy tych przyrostów. Są więc powszechnie stosowane na wejściach przemysłowych przetworników i

komputerowych systemów pomiarowych. Przy większych przyrostach immitancji pojawiają się nieliniowości sygnału wyjściowego, ale ich wpływ można eliminować przez odpowiedni dobór elementów w mostku, sprzężenie zwrotne [21] lub korekcję w przetwarzaniu sygnału po stronie cyfrowej. Dlatego autor uznał, że należy gruntownie przeanalizować możliwości pomiarów wieloparametrowych w nierozłączalnych układach czterogałęziowych mostków rezystancyjnych zarówno klasycznych o jednoprządowym zasilaniu, jak i zasilanych niekonwencjonalnie – dwuprządowo. Wyniki pracy można też wykorzystywać przy określaniu zmian parametrów obiektu badanego o schemacie zastępczym w postaci pełnego mostka (czworobok zupełny), jeśli zależą one równocześnie od kilku wielkości.

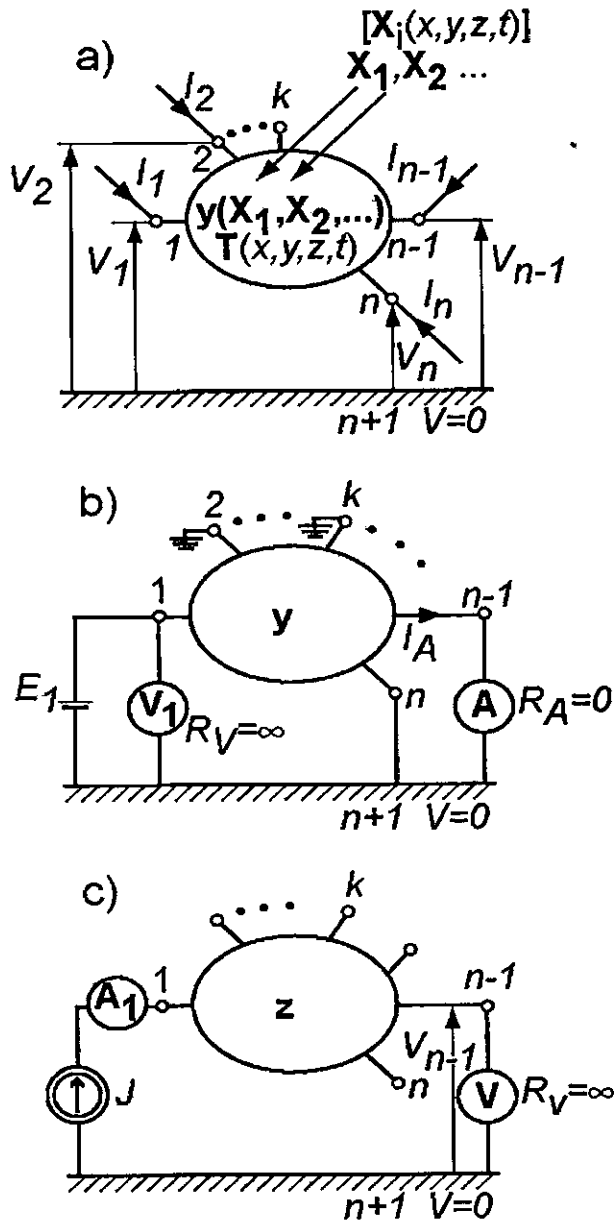
1.5. Podstawowe równania układu 4T

Do dalszych rozważań konieczne jest przytoczenie kilku pojęć podstawowych i przystosowanie zależności wynikających z teorii obwodów elektrycznych do potrzeb tematyki pracy. I tak, dowolny układ o dostępnych na zewnątrz n końcówkach, zwanych też zaciskami, określa się tu akronimem: układ nT (n-Terminal). W literaturze używa się też terminu układ n-biegunowy lub n-biegunnik. Układ taki przedstawiono na rys. 1.2a.

Wszystkie prądy i napięcia całego układu, jak i jego części, w każdej chwili muszą spełniać prądowe i napięciowe prawa Kirchoffa. Jego współpracę z dołączonymi obwodami zewnętrznymi opisuje się poprzez zależności pomiędzy prądami i napięciami łączących końcówek. W szczególnym wypadku prądy zacisków mogą być parami przeciwne, a niektóre z zacisków - nawet wspólne, tj. ze sobą zwarte. Skojarzoną ze sobą parę zacisków o przeciwnych prądach nazywa się wrotami, bramą lub portem i wówczas układ nT staje się wielowrotnikiem lub układem wielobramowym, oznaczanym ogólnie jako układ nP. Można go opisywać na różne sposoby mniejszą niż poprzednio liczbą równań zależną od liczby wrót. Wiążą one ze sobą napięcia i prądy wrót. Przy wyodrębnionych w układzie tylko dwu wrotach otrzymuje się czwórnik.

Elementy schematów zastępczych opisujących mierzone obiekty, układy do pomiarów immitancji oraz układy z czujnikami pomiarowymi mogą zależeć w różny sposób od wielkości wpływających, z których jedna, lub kilka, jest pośrednio mierzona poprzez pomiary parametrów układu, a wpływy innych są eliminowane lub minimalizowane.

Jeśli dla pewnej kombinacji wartości elementów wewnętrznych dowolnego układu, potencjały jego dwu niezwartych węzłów są jednakowe lub prądy dwu gałęzi dołączonych do wspólnego węzła są przeciwne, to stany takie nazywa się stanami równowagi tego układu. Dwa takie węzły można wówczas ze sobą zwierzać, zaś obie połączone ze sobą gałęzie odłączać od węzła i w obu wypadkach prądy i napięcia w całym układzie nie ulegną zmianom.



Rys. 1.2. a) - Układ n -biegunnika (układ nT); b) pomiar elementu y_{31} jego macierzy Y , c) pomiar elementu z_{31} macierzy Z

Fig. 1.2. a) n -Terminal (nT) circuit; b) measurement of y_{31} element of matrix Y , c) measurement of z_{31} element of matrix Z .

Stany równowagi wykorzystuje się powszechnie w technice pomiarowej zarówno w układach wymagających równoważenia poprzez zmianę elementów lub prądów, czy napięć, jak i w układach niezrównoważonych – jako ich początkowy stan odniesienia.

W analizie, syntezie i optymalizacji elektrycznych układów pomiarowych korzysta się z teorii obwodów. Otrzymane zależności wykorzystuje się następnie w analizie dokładności pomiarów. Omówimy krótko podstawowe metody opisu układów liniowych. Ogólny schemat takiego układu o dwu wielkościach wpływających przedstawiono na rys. 1.2.

Układ odosobniony, który nie propaguje energii elektromagnetycznej, o parametrach skupionych (gdy długość fali przebiegu elektrycznego o największej częstotliwości jest znacznie większa niż wymiary geometryczne elementów układu) i liniowych lub linearyzowanych wokół punktów pracy, opisują następujące równania macierzowe o postaci admitancyjnej lub impedancyjnej.

$$\mathbf{I} = \mathbf{YV} - \mathbf{J} \quad (1.5a)$$

lub

$$\mathbf{U} = \mathbf{Z}'\mathbf{I}' + \mathbf{E} \quad (1.5b)$$

gdzie: \mathbf{I} – macierz kolumnowa prądów wpływających do układu przez jego końcówki;

\mathbf{V} – macierz kolumnowa potencjałów końcówek względem punktu odizolowanego od układu o potencjale przyjętym umownie za 0;

\mathbf{U} – macierz kolumnowa napięć między kolejnymi końcówkami układu;

\mathbf{I}' – macierz kolumnowa prądów oczkowych;

\mathbf{Y} , \mathbf{Z}' – macierze nieoznaczone: admitancyjna i impedancyjna układu o sumie elementów w każdej kolumnie i w każdym wierszu równej zeru. (wynika to z praw Kirchoffa dla układu jako całości);

\mathbf{J} , \mathbf{E} – macierze kolumnowe zastępczych stacjonarnych źródeł prądowych lub napięciowych układu na jego zaciskach.

Macierz \mathbf{Y} ma wymiary $n \times n$, a jej elementy oznacza się następująco:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nm} \end{bmatrix} \quad (1.5c)$$