

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW

PIAP
MERA-PIAP

Al. Jerozolimskie 202

02-222 Warszawa

Telefon 23-70-81

ZESPÓŁ AUTOMATYKI ELEKTRONICZNEJ

4410

BE10

Główny wykonawca doc.dr inż. Jacek Korytkowski

Wykonawcy techn. Krystyna Miedziarska

Konsultant

Nr zlecenia S1489

Metoda analizy parametrów dokładnościowych układów elektronicznych stosujących wzmacniacze monolityczne oraz eksperymentalne sprawdzenie metody.....

Etap 2. Sformułowanie metody oraz dokonanie analizy dokładności przykładowego układu elektronicznego źródła stałych napięć wzorcowych.

Zleceniodawca

Praca statutowa PIAP

Pracę rozpoczęto dnia 30.11.94

zakończono dnia 25.12.94

Z-ca Dyrektora ds. Badawczo-Rozwojowych

Kierownik Zespołu

dr inż. J. Jabłkowski

doc.dr inż. J. Korytkowski

Praca zawiera:

Rozdzielnik - ilość egz:

stron 30

Egz. 1 OIN

rysunków 8

Egz. 2 ZAE

fotografii

Egz. 3 ZAE-1

tabel

Egz. 4

tablic

Egz. 5

załączników

Egz. 6

7166

Nr rejestr.

4

Analiza deskrypcyjowa

METODA ANALIZY UKŁADU ELEKTRONICZNEGO. BADANIE BŁĘDÓW UKŁADU ELEKTRONICZNEGO ŹRÓDŁA WZORCA NAPIĘCIA.

Analiza dokumentacyjna

Opracowanie zawiera omówienie podstawowych parametrów wzmacniaczy monolitycznych oraz precyzuje uproszczony schemat zastępczy układu wzmacniacza. Wymienione są ważniejsze wielkości i czynniki wpływające na parametry wzmacniaczy stanowiące przyczyny błędów dokładności układów elektronicznych. Przedstawiona jest zaproponowana przez autora "metoda zerowych napięć wejściowych wzmacniaczy" służąca do wyznaczenia opisu sygnałów układów elektronicznych ze wzmacniaczami w zależności od parametrów tych wzmacniaczy. Podane są przykłady zastosowania metody do analizy układów ze wzmacniaczami oraz przedstawiona jest analiza błędów przykładowego układu elektronicznego źródła stałych napięć wzorcowych.

Tytuły poprzednich sprawozdań

J.Korytkowski : Metoda analizy parametrów dokładnościowych układów elektronicznych stosujących wzmacniacze monolityczne oraz eksperymentalne sprawdzenie metody Etap 1. Wykonanie i badanie modelowego układu źródła napięć wzorcowych z wykorzystaniem nowoczesnych wzmacniaczy monolitycznych.
Nr rejestr. 7156.

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	2
2. Podstawowe parametry oraz schemat zastępczy układu wzmacniacza monolitycznego	3
2.1. Podstawowe parametry wzmacniaczy monolitycznych	3
2.2. Schemat zastępczy układu wzmacniacza monolitycznego	6
3. Metody analizy liniowych układów elektronicznych ze wzmacniaczami monolitycznymi	9
3.1. Wielkości i czynniki wpływające na parametry wzmacniaczy monolitycznych stanowiące przyczyny błędów dokładności układów elektronicznych	9
3.2. Metoda zerowych napięć wejściowych wzmacniaczy przeznaczona do analizy układów elektronicznych ze wzmacniaczami monolitycznymi	11
3.3. Przykłady zastosowania metody zerowych napięć wejściowych wzmacniaczy	12
3.3.1. Układ wzmacniacza sumującego	12
3.3.2. Układ integratora	14
3.3.3. Układ źródła napięć wzorcowych	15
4. Analiza błędów przykładowego układu źródła stałych napięć wzorcowych	18
5. Zakończenie	22
6. Literatura	22
Rysunki	

1. Wstęp

W dobie powszechnej dominacji układów mikroprocesorowych w elektronicznej technice urządzeń automatyki i pomiarów są powszechnie stosowane układy liniowe wzmacniaczy monolitycznych. Bez wzmacniaczy monolitycznych nie można zrealizować takich układów jak:

- wzmacniacze pomiarowe małych poziomów sygnałów,
- źródła sygnałów wzorcowych (referencyjnych),
- dokładne separatory oddzielenia galwanicznego sygnałów,
- przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe.

Brak jest w literaturze specjalistycznej opisu prostych metod analizy liniowych układów elektronicznych stosujących wzmacniacze monolityczne umożliwiającą określenie właściwości dokładnościowych układów służących do przetwarzania sygnałów. Celem tematu jest przedstawienie prostej metody analizy własności statycznych liniowych układów elektronicznych służących do przetwarzania sygnałów i stosujących wzmacniacze monolityczne oraz podanie sposobu analizy błędów sygnałów od wielkości i czynników wpływających na pracę układu.

Błędy odwzorowania sygnałów układów elektronicznych służących do przetwarzania tych sygnałów określa się zazwyczaj przeprowadzając badanie wrażliwości tych sygnałów w danym układzie elektronicznym na wpływ wynikających z warunków pracy układu różnych czynników zewnętrznych takich jak: temperatura, napięcie zasilania, upływ czasu. Wpływ czynników zewnętrznych na sygnały układu elektronicznego jest wynikowym efektem działania tych czynników na poszczególne parametry elementów elektronicznych, w tym i wzmacniaczy monolitycznych zastosowanych w układzie elektronicznym.

Należy zwrócić uwagę, że do budowy nowoczesnych układów elektronicznych przetwarzania sygnałów stosuje się bardzo doskonale elementy elektroniczne takie jak: rezystory precyzyjne (wpływ temperatury rzędu kilku części milionowych czyli ppm na jeden $^{\circ}C$) oraz diody napięć referencyjnych (wpływ temperatury rzędu 5 ppm na jeden $^{\circ}C$), toteż o właściwościach tych układów mogą decydować parametry wzmacniaczy monolitycznych w zależności od schematu układu elektronicznego.

Właściwości elektronicznych układów przetwarzania sygnałów można charakteryzować wrażliwością ich sygnałów wyjściowych na zmiany parametrów elementów układu elektronicznego. Ale sygnały wyjściowe układu elektronicznego są niczym innym jak napięciami lub prądami wyjściowymi wzmacniaczy zastosowanych w układzie. Tak, więc analizę statycznych parametrów układu elektronicznego sprowadzić można do analizy napięć lub prądów układu jako funkcji parametrów elementów układu. Badanie statycznych

parametrów dokładnościowych. układu elektronicznego przeprowadza się analizując wrażliwość sygnałów tego układu jako funkcji parametrów elementów zastosowanych w układzie a w szczególności parametrów wzmacniaczy monolitycznych na wpływ różnych czynników zewnętrznych.

Dla zrealizowania głównego celu opracowania niżej zostaną omówione podstawowe parametry układu wzmacniacza monolitycznego oraz zostaną one przypisane elementom zaproponowanego uproszczonego schematu zastępczego tego wzmacniacza .

Następnie zostanie przedstawiona metoda wyznaczenia zależności sygnałów napięciowych układu elektronicznego o określonym schemacie od parametrów elementów istniejących na tym schemacie nazwana " metodą zerowych napięć wzmacniaczy analizy układu elektronicznego" .

Podana metoda analizy układu elektronicznego ze wzmacniaczami zostanie zilustrowana przykładami.

Na zakończenie zostanie dokonana analiza błędów przykładowego układu elektronicznego źródła stałych napięć wzorcowych.

Opracowanie niniejsze dotyczy metod określania statycznych właściwości układów elektronicznych ze wzmacniaczami monolitycznymi. Autor nie będzie się zajmował właściwościami dynamicznymi układów elektronicznych.

2.Podstawowe parametry oraz schemat zastępczy układu wzmacniacza monolitycznego

2.1 Podstawowe parametry wzmacniaczy monolitycznych

Wzmacniacz monolityczny zwany też wzmacniaczem operacyjnym stał się podstawowym elementem w oparciu o który realizuje się funkcje przetwarzania sygnałów w układach elektronicznych stosowanych w urządzeniach pomiarowych i automatyki.

Wprowadzenie terminu "wzmacniacz operacyjny" wiąże się z amerykańską publikacją [1] z 1947 roku , dotyczącą dynamicznego modelowania procesów dynamicznych . Był to okres stosowania do celów pomiarowych elektronowych lampowych wzmacniaczy prądu stałego [2].

W roku 1962 firmy amerykańskie Burr Brown Research Corporation oraz Philbrick Research Inc. wprowadziły na rynek modułowe w pełni tranzystorowe wzmacniacze operacyjne. Wzmacniacze takie były także opracowane i stosowane w Polsce [3] [4].

Pierwsze monolityczne wzmacniacze operacyjne powszechnie przyjęte przez użytkowników pochodziły z 1965 roku z firmy Fairchild Semiconductor . Były to wzmacniacze serii $\mu A700$. Najbardziej rozpowszechniły się wzmacniacze początkowo typu $\mu A709$ a później $\mu A741$, którego odpowiedniki stanowią podstawowy program produkcyjny wszystkich firm

oferujących liniowe układy scalone (np. TESLA MAA741, UNITRA ULY7741). Na początku lat siedemdziesiątych oprócz wzmacniacza $\mu A741$ pojawiły się inne wzmacniacze zaliczane do wzmacniaczy drugiej generacji np. $\mu A725$ - wysokostabilny, $\mu A776$ - o niskim poborze mocy. Nieco później pojawiły się wzmacniacze zwane BIFET (stosujące tranzystory zarówno bipolarnie jak i unipolarnie typu FET) o znacznie szerszym paśmie częstotliwości przenoszonych sygnałów. Koniec lat siedemdziesiątych przyniósł wzmacniacze monolityczne trzeciej generacji np. typu mono OP-07, strojone laserem o znacznie polepszonych parametrach przy wzmacnianiu sygnałów napięcia stałego. Na przykład dla wzmacniacza OP-07A dryft długoczasowy napięcia odniesiony do wejścia nie jest większy niż $0,2 \mu V$ w czasie jednego miesiąca.

Wzmacniacz monolityczny jest wielotranzystorowym układem wzmacniającym o sprzężeniach bezpośrednich zawierający kilka stopni wzmacniania o bardzo dużym współczynniku wzmocnienia napięciowego od $10^4 V/V$ do $10^7 V/V$. Przewidziany jest do pracy w szerokim przedziale zmian częstotliwości od zera (wzmacnianie napięć stałych) do kilku lub kilkuset kiloherców. Jest on tak zaprojektowany, że pracuje stabilnie (bez wzbudzeń) przy bardzo głębokich ujemnych sprzężeniach zwrotnych wytwarzanych przez zewnętrzne obwody sprzężenia zwrotnego typu rezystancyjnego R lub rezystancyjno - pojemnościowego RC. Należy podkreślić, że ze względu na stosowanie ujemnego sprzężenia zwrotnego, właśnie te zewnętrzne obwody sprzężenia zwrotnego formują charakterystyki przetwarzania sygnałów, a parametry samego wzmacniacza wpływają w sposób nie decydujący na charakterystyki.

Wzmacniacz monolityczny jest wzmacniaczem różnicowym o dwu końcówkach wejścia: nieinwersyjnej "+" i inwersyjnej "-", które pracują prawie niezależnie od wartości średniego poziomu napięć na tych końcówkach w zagwarantowanym przez producenta polu napięć wejściowych. Wzmacniacz ten ma jedną końcówkę wyjściową sterowanego źródła napięcia wyjściowego, którego drugi biegun połączony jest ze wspólnym punktem zasilania wzmacniacza. Napięcie sterowanego źródła wyjściowego wzmacniacza jest sterowane różnicą napięć doprowadzonych do wejścia nieinwersyjnego "+" oraz wejścia inwersyjnego "-".

Schemat zastępczy wzmacniacza podano na Rys. 1.

Niżej zostaną podane określenia najważniejszych parametrów wzmacniacza. Przy czym podana terminologia będzie zgodna z publikacjami [5] [6] i nazewnictwem stosowanym w zespole kierowanym przez autora.

Wejściowe napięcie wspólne : wartość średnia napięć doprowadzonych pomiędzy wspólnym punktem zasilania a zaciskami wejściowymi

$$U_w = \frac{U_1 + U_2}{2}. \quad (1)$$

Różnicowe napięcie wejściowe : różnica napięć pomiędzy zaciskami wejściowymi wzmacniacza

$$U_r = U_1 - U_2. \quad (2)$$

Prąd polaryzacji wejścia : wartość prądu wpływającego do końcówki wejściowej wzmacniacza

$$\text{prąd polaryzacji wejścia nieinwersyjnego} - I_{p1} \quad (3)$$

$$\text{prąd polaryzacji wejścia inwersyjnego} - I_{p2}. \quad (4)$$

Wejściowy prąd niezrównoważenia : różnica wartości prądów polaryzacji wejść

$$I_n = I_{p1} - I_{p2}. \quad (5)$$

Wejściowe napięcie niezrównoważenia : jest to takie różnicowe napięcie wejściowe, które przy swobodnym dopływie prądów polaryzacji wejść wzmacniacza powoduje, że napięcie wyjściowe jest równe zero; napięcie niezrównoważenia oznacza się symbolem U_n . (6)

Rezystancja dla napięcia wspólnego : iloraz przyrostu napięcia wspólnego i odpowiedniego przyrostu sumy prądów polaryzacji obydwu wejść, dla takich wartości napięcia różnicowego przy których napięcie wyjściowe jest równe zero

$$R_{sw} = \frac{\Delta U_w}{\Delta I_{p1} + \Delta I_{p2}}. \quad (7)$$

Rezystancja wejściowa : iloraz przyrostu napięcia różnicowego i odpowiadającego mu przyrostu prądu niezrównoważenia przy napięciu wspólnym równym zero

$$R_{we} = \frac{\Delta U_r}{\Delta I_n}. \quad (8)$$

Rezystancja wyjściowa: wartość zastępczej rezystancji szeregowej ze źródłem napięcia wyjściowego; rezystancję wyjściową oznacza się R_{wy} . (9)

Napięcie wyjściowe: napięcie wyjściowe wzmacniacza względem wspólnego punktu zasilania mierzone przy pomijalnym spadku napięcia na rezystancji wyjściowej; napięcie wyjściowe oznacza się U_{wy} . (10)

Wzmocnienie napięciowe : iloraz przyrostu napięcia wyjściowego oraz odpowiadającego mu przyrostu napięcia różnicowego

$$k_U = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_r}. \quad (11)$$

Współczynnik tłumienia napięcia wspólnego : iloraz (lub 20 logarytmów ilorazu) zmiany wartości napięcia wspólnego ΔU_w i wytworzonej przez to napięcie wspólne zmianę wartości napięcia niezrównoważenia ΔU_{nw} przy niezmienionej wartości napięcia wyjściowego

$$WTSW = \frac{\Delta U_w}{\Delta U_{nw}}, \quad (12a)$$

$$WTSW \log = 20 \log_{10} \frac{\Delta U_w}{\Delta U_{nw}}. \quad (12b)$$

Współczynnik tłumienia zmian napięcia zasilania : iloraz (lub 20 logarytmów ilorazu) zmiany wartości symetrycznego dwubiegunowego napięcia zasilania ΔU_z i wywołanej nią zmiany wartości napięcia niezrównoważenia ΔU_{nz} przy niezmienionej wartości napięcia wyjściowego

$$WTNZ = \frac{\Delta U_z}{\Delta U_{nz}}, \quad (13a)$$

$$WTNZ \log = 20 \log_{10} \frac{\Delta U_z}{\Delta U_{nz}}. \quad (13b)$$

Dryft temperaturowy napięcia niezrównoważenia : różnica między wartościami napięcia niezrównoważenia U_{nT2} dla temperatury T2 i U_{nT1} dla temperatury T1 odniesiona do różnicy tych temperatur

$$\delta U_{nT} = \frac{U_{nT2} - U_{nT1}}{T2 - T1} = \frac{\Delta U_{nT}}{\Delta T}. \quad (14)$$

Dryft czasowy napięcia niezrównoważenia : różnica między wartościami napięcia niezrównoważenia wyznaczona dla dwu czasów t_2 i t_1 odniesiona do przedziału czasowego

$$\delta U_{nr} = \frac{U_{nr2} - U_{nr1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta U_{nr}}{\Delta t}. \quad (15)$$

Dryft temperaturowy prądu polaryzacji : różnica między wartościami prądu polaryzacji I_{pT2} dla temperatury T2 i I_{pT1} dla temperatury T1 odniesiona do różnicy tych temperatur

$$\delta I_{pT} = \frac{I_{pT2} - I_{pT1}}{T2 - T1} = \frac{\Delta I_{pT}}{\Delta T}. \quad (16)$$

Dryft temperaturowy prądu niezrównoważenia : różnica między wartościami prądu niezrównoważenia I_{nT2} dla temperatury T2 i I_{nT1} dla temperatury T1 odniesiona do różnicy tych temperatur

$$\delta I_{nT} = \frac{I_{nT2} - I_{nT1}}{T2 - T1} = \frac{\Delta I_{nT}}{\Delta T}. \quad (17)$$

2.2. Schemat zastępczy układu wzmacniacza monolitycznego

Odpowiednio do opisu wzmacniacza i podanych w p.2.1 określił jego parametrów schemat układu zastępczego wzmacniacza podaje Rys.1 . Warto odnotować , że w literaturze [7] można znaleźć nieco odmienny schemat zastępczy wzmacniacza , na którym źródła napięć niezrównoważenia występują szeregowo zarówno z wejściem nieinwersyjnym "+" jak i szeregowo z wejściem inwersyjnym "-" a rezystancja dla napięcia wspólnego występuje w postaci dwu rezystancji o wartościach $2R_{sw}$ dołączonych po jednej pomiędzy punktem

wspólnym i do każdego wejścia "+" i "-" wzmacniacza. Zdaniem autora niniejszego opracowania podawany schemat wg literatury [7] nie ma uzasadnienia teoretycznego w zakresie podziału napięcia niezrównoważenia na dwa źródła a schemat z dwoma rezystorami $2R_{sw}$ jest równoważny schematowi podanemu na Rys.1 z jednym rezystorem o wartości R_{sw} włączonym do punktu pośredniego dzielnika złożonego z dwu rezystancji $\frac{1}{2}R_{we}$.

Omawiając schemat podany na Rys.1 należy zwrócić uwagę, że układ zastępczy wzmacniacza można traktować jako układ liniowy przy spełnieniu następujących warunków:

- dla danych napięć zasilających dodatniego U_{zd} oraz ujemnego U_{zu} napięcie wspólne U_w mieści się w gwarantowanym polu napięć wejściowych;
- napięcie wyjściowe U_{wy} mieści się w gwarantowanym polu napięć wyjściowych;
- obciążenie wyjścia wzmacniacza nie przekracza wartości dopuszczalnej.

Współczesne wzmacniacze monolityczne są tak projektowane, że mają następujące właściwości:

- poszczególne składowe źródła napięć niezrównoważenia U_{n0}, \dots, U_{nr} są bardzo małe w stosunku do przetwarzanych sygnałów napięciowych;
- źródła prądów polaryzacji I_{p1} i I_{p2} są bardzo małe w stosunku do przetwarzanych sygnałów prądowych;
- rezystancje dla sygnału wspólnego R_{sw} oraz rezystancja wejściowa R_{we} są bardzo duże a więc prądy w tych rezystancjach mogą być pomijalne;
- rezystancja wyjściowa R_{wy} jest bardzo mała a więc spadek napięcia na tej rezystancji może być pomijalny;
- wzmocnienie napięciowe k_U ma bardzo dużą wartość;
- parametrem dominującym w układzie wzmacniacza decydującym o jego pracy jest sterowane źródło napięcia wyjściowego, którego wartość jest proporcjonalna do napięcia U_{we} a współczynnikiem proporcjonalności jest wzmocnienie napięciowe (11) wg zależności:

$$U_{wy} = k_U U_{we}. \quad (18)$$

Biorąc pod uwagę to co zostało podane wyżej, można w pierwszym przybliżeniu zakładać, że sygnał wyjściowy wzmacniacza U_{wy} przyjmuje wartości wynikające z parametrów obwodu zewnętrznego ujemnego sprzężenia zwrotnego i obwodu sterowania wzmacniacza.

Jednak przy realizacji dokładnych elektronicznych układów pomiarowych i układów przetwarzania sygnałów wyżej podane przybliżenie nie może być stosowane. Należy uwzględnić poszczególne parametry wzmacniacza, które zostały odwzorowane: źródłami napięć, źródłami prądów oraz rezystancjami podanymi na schemacie zastępczym na Rys.1.

Analizując szczegółowe wartości poszczególnych parametrów różnych stosowanych powszechnie wzmacniaczy monolitycznych można wprowadzić pewne istotne uproszczenia schematu zastępczego wzmacniacza, które znacznie ułatwią analizę układów ze wzmacniaczami.

Rezystancja wyjściowa wzmacniaczy wynosi zazwyczaj kilkadziesiąt omów i tak dla wzmacniacza $\mu A741C$ wynosi 75Ω a dla wzmacniacza OP-07C wynosi ona 60Ω co oznacza, że przy obciążeniu prądem do 5 mA napięcie na tej rezystancji nie przekracza $0,4 \text{ V}$ a to stanowi tylko 3% pełnego pola napięć wyjściowych ($\pm 13 \text{ V}$). Przyjęcie założenia upraszczającego, że rezystancja wyjściowa jest równa zero może być zrównoważone założeniem, że wzmocnienie napięciowe jest mniejsze o ok. 3%. Ponieważ wzmocnienia te mają wartości bardzo duże np. dla $\mu A741C$ ok. $1,5 \cdot 10^5 \text{ V/V}$ a dla OP-07C 10^6 V/V to przyjęcie zmniejszonych o 3% wartości tych wzmocnień pozwoli w dalszym ciągu traktować, że są one bardzo duże ($1,45 \cdot 10^5 \text{ V/V}$ oraz $0,97 \cdot 10^6 \text{ V/V}$).

Rezystancja dla napięcia wspólnego wzmacniaczy jest bardzo duża i przykładowo dla wzmacniacza $\mu A741C$ wynosi $0,5 \text{ G}\Omega$ a dla wzmacniacza OP-07C wynosi $30 \text{ G}\Omega$. Są to wartości rezystancji o cztery rzędy wielkości wyższe niż wartości rezystancji rezystorów stosowanych w układach wzmacniaczy (praktycznie do $100 \text{ k}\Omega$). Z tego też powodu rezystancję dla napięcia wspólnego można przyjąć jako pomijalną (przerwa) w stosunku do innych w układzie. Dzięki takiemu założeniu na schemacie zastępczym wzmacniacza znika połączenie wewnętrzne pomiędzy obwodem wejścia wzmacniacza (końcówki "+" i "-") a wspólnym punktem zasilania (brak rezystancji R_{sw}).

Trzecie kolejne uproszczenie schematu wzmacniacza wynika z założenia, że wzmocnienie napięciowe wzmacniacza jest nieskończenie duże. Zasadność przyjęcia takiego założenia wynika z właściwości aktualnie produkowanych wzmacniaczy dla których wzmocnienie to nie jest mniejsze od 10^5 V/V . Dla typowych układów wzmacniających o poziomach sygnałów napięciowych $0..10 \text{ V}$ nie uwzględnienie skończonej wartości wzmocnienia napięciowego może być powodem błędu obliczenia dokładności układu rzędu $0,001\%$ a więc jest to błąd praktycznie pomijalny.

W wyniku wprowadzenia opisanych wyżej trzech uproszczeń uzyskuje się schemat zastępczy wzmacniacza monolitycznego podany na Rys.2. Wejście wzmacniacza w wyniku przyjętego uproszczenia ma właściwości dwójnika osobliwego - nulatora (dla dowolnego stanu napięcie $U=0$ oraz prąd $I=0$), toteż symbol nulatora użyto na tym schemacie.

Na schemacie podanym na Rys.2 zamiast kilku szeregowych źródeł napięć niezrównoważenia narysowano jedno źródło, które zastępuje poszczególne źródła składowe podane poprzednio na Rys.1.

Należy jednak zwrócić uwagę, że uproszczony schemat zastępczy wzmacniacza monolitycznego podany na Rys.2 ma ograniczony zakres stosowania. Daje on bardzo dobre wyniki przy analizie własności statycznych układów elektronicznych ze wzmacniaczami monolitycznymi. Schematu tego na pewno nie można stosować przy badaniu stabilności dynamicznej układów ze wzmacniaczami, gdyż stabilność dynamiczna zależy od charakterystyk częstotliwościowych wzmocnienia.

3. Metody analizy liniowych układów elektronicznych ze wzmacniaczami monolitycznymi

3.1 Wielkości i czynniki wpływające na parametry wzmacniaczy monolitycznych stanowiące przyczyny błędów dokładności układów elektronicznych

Należy wymienić następujące ważniejsze wielkości i czynniki wpływające na parametry wzmacniaczy monolitycznych:

- napięcie wspólne U_w ,
- napięcie zasilania U_z ,
- temperatura otoczenia T ,
- upływ czasu t pracy wzmacniacza i wynikający z tego dryft długoczasowy.

Wyżej wymienione wielkości i czynniki mają zauważalny wpływ na niektóre parametry wzmacniacza tak jak to opisano w punkcie 2.1 przytaczając określenia parametrów wzmacniacza a parametry te są reprezentowane przez odpowiednie składowe źródła napięciowe lub źródła prądowe na schemacie zastępczym wzmacniacza podanym na Rys.2.

Podane tam sumaryczne źródło U_n napięcia niezrównoważenia zawiera składowe określone zależnością:

$$U_n = U_{n0} + \Delta U_{nz} + \Delta U_{nw} + \Delta U_{nT} + \Delta U_{nt} \quad (19)$$

gdzie:

ΔU_{nz} - zmiana napięcia niezrównoważenia wywołana zmianą napięcia zasilania ΔU_z określona zależnością (13a),

ΔU_{nw} - zmiana napięcia niezrównoważenia wywołana zmianą napięcia wspólnego ΔU_{ws} określona zależnością (12a),

ΔU_{nT} - zmiana napięcia niezrównoważenia wywołana zmianą temperatury otoczenia ΔT określona zależnością (14),

ΔU_{nt} - zmiana napięcia niezrównoważenia zaobserwowana przy pracy długotrwałej wzmacniacza dla przedziału czasowego Δt określona zależnością (15),

U_{n0} - początkowa wartość napięcia niezrównoważenia wzmacniacza w warunkach odniesienia przy których pozostałe składowe mają wartości pomijalne.

Podobnie podane na Rys.2 źródła prądowe I_{p1} oraz I_{p2} prądów polaryzacji zawierają składowe określone zależnościami :

$$I_{p1} = I_{p10} + \Delta I_{p1T} \quad (20)$$

$$I_{p2} = I_{p20} + \Delta I_{p2T} \quad (21)$$

gdzie :

ΔI_{p1T} oraz ΔI_{p2T} - zmiany odpowiednich prądów polaryzacji I_{p1} oraz I_{p2} wywołane zmianą temperatury otoczenia o ΔT określone zależnością (16)

I_{p10} oraz I_{p20} - początkowe wartości prądów polaryzacji w warunkach odniesienia przy których pozostałe składowe mają wartości pomijalne.

Należy zwrócić uwagę na fakt , że według producentów wzmacniaczy monolitycznych inne potencjalne możliwe składowe zmian prądów polaryzacji są pomijalne i nie są specyfikowane.

Należy również zwrócić uwagę na to , że w niektórych układach wzmacniaczy monolitycznych błędy przetwarzania sygnałów są zależne bezpośrednio od zmian prądu niezrównoważenia I_n określonego wzorem (5) jako różnica prądów polaryzacji $I_n = I_{p1} - I_{p2}$.

Dla takich układów prąd niezrównoważenia wyrazić można wzorem:

$$I_n = I_{n0} + \Delta I_{nT} \quad (22)$$

gdzie :

ΔI_{nT} - zmiana prądu niezrównoważenia wywołana zmianą temperatury otoczenia o ΔT określona zależnością (17) ,

I_{n0} - początkowa wartość prądu niezrównoważenia w warunkach odniesienia przy których pozostałe składowe mają wartości pomijalne.

Należy tu odnotować fakt , że producenci wzmacniaczy monolitycznych na ogół nie specyfikują innych składowych zmian prądów niezrównoważenia wzmacniaczy.

Na zakończenie niniejszego rozdziału chcę zwrócić uwagę na ogólny sposób postępowania w celu określenia parametrów dokładnościowych analizowanego układu elektronicznego.

Pierwszym etapem analizy układu będzie sporządzenie schematu elektrycznego całego układu w którym wzmacniacze będą zastąpione uproszczonymi schematami zastępczymi według Rys.2 . W ten sposób parametry tych wzmacniaczy zostaną wprowadzone do schematu ogólnego układu.

Drugim etapem analizy układu będzie wyznaczenie zależności istotnych dla danego układu sygnałów napięciowych lub prądowych do parametrów elementów układu oraz

parametrów wzmacniaczy monolitycznych. W ten sposób zostaną jednoznacznie określone zależności istotnych sygnałów występujących w układzie od parametrów elementów i parametrów wzmacniaczy, które podlegają wpływom od wielkości i czynników zewnętrznych.

Metoda analizy układu elektronicznego umożliwia wyznaczenie zależności istotnych sygnałów od parametrów elementów występujących na schemacie zastępczym układu zostanie przedstawiona w następnym rozdziale.

3.2. Metoda zerowych napięć wejściowych wzmacniaczy przeznaczona do analizy układów elektronicznych ze wzmacniaczami monolitycznymi

Jest to metoda uproszczona analizy własności statycznych układów elektronicznych ze wzmacniaczami. Uproszczony schemat zastępczy wzmacniacza podaje Rys.2. Rezystancja wejściowa na tym schemacie została zastąpiona elementem osobliwym - nulatorem. Element ten charakteryzuje w dowolnych warunkach stan: napięcie na nulatorze równe zero oraz prąd w nulatorze też równy zero.

Przyjęte uproszczenie schematu zastępczego wzmacniacza, który pracuje w obwodzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym pozwala traktować źródło napięcia wyjściowego U_{wy} jako źródło niesterowane o wartości odpowiadającej istniejącym w układzie wymuszeniom, przy której napięcie na zaciskach nulatora jest równe zero przy czym prąd w nulatorze jest też równy zero. Równanie opisujące układ elektroniczny otrzymuje się z opisu warunku zerowej wartości napięcia na nulatorze.

Omawianą metodę stosować można z powodzeniem dla układów z wieloma wzmacniaczami, w których zastosowano ujemne sprzężenia zwrotne. Napięcia wyjściowe poszczególnych wzmacniaczy określa układ równań wynikający z warunku zerowych napięć na nulatorach poszczególnych wejść wzmacniaczy. Dla liczby k poszukiwanych napięć wyjściowych otrzymuje się k równań niezależnych opisujących warunek zerowych napięć dla liczby k nulatorów poszczególnych wejść wzmacniaczy.

Schemat zastępczy układu zawierającego liczbę k wzmacniaczy podaje rysunek Rys.3. W układzie tym wyodrębniono sieć pasywną oraz układ k nulatorów: n_1, n_2, \dots, n_k oraz k źródeł napięć wyjściowych $U_{wy1}, U_{wy2}, \dots, U_{wyk}$ a także U_1, U_{l+1}, \dots, U_m napięciowych źródeł niezależnych i I_p, I_{p+1}, \dots, I_z prądowych źródeł niezależnych reprezentujących sygnały wymuszające oraz parametry elementów ze schematów zastępczych wzmacniaczy. Układ ten opisać można liczbą k równań napięć na poszczególnych nulatorach kolejno: n_1, n_2, \dots, n_k :

współczynników równań wyjaśniono przy ilustracji stosowania metody zerowych napięć wejściowych wzmacniaczy dla przykładowych układów.

3.3. Przykłady zastosowania metody zerowych napięć wejściowych wzmacniaczy

3.3.1 Układ wzmacniacza sumującego

Schemat wzmacniacza sumującego został podany na Rys.4a . Schemat zastępczy układu wykorzystujący uproszczony schemat wzmacniacza monolitycznego podany jest na Rys.4b . Dla rozpatrywanego układu przyjęto następujące oznaczenia:

$$R_{abc} = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c}} \quad , \quad (27)$$

$$R_{abcs} = \frac{R_{abc} R_s}{R_{abc} + R_s} \quad . \quad (28)$$

Napięcie na zaciskach nulatora oznaczonych a b może być zgodnie ze wzorem (23) opisane równaniem :

$$U_{ab} = a_1 U_{wy} + b_2 U_a + b_3 U_b + b_4 U_c + b_5 I_{p1} + b_6 I_{p2} + b_7 U_n \quad (29)$$

przy czym zgodnie z właściwością nulatora :

$$U_{ab} = 0 \quad . \quad (30)$$

W celu wyznaczenia poszczególnych współczynników a_1, b_2, \dots, b_7 dokonamy analizy układu stosując zasadę superpozycji . Metoda takiej analizy bywa zwana metodą superpozycji . Przy analizie tej przyjmujemy , że napięcie na końcówkach nulatora U_{ab} jest sumą składowych napięć : $U_{ab}^{(1)}, U_{ab}^{(2)}, \dots, U_{ab}^{(7)}$ pojawiających się w układzie na zaciskach a i b gdy działają kolejno poszczególne źródła napięć i prądów $U_{wy}, U_a, U_b, \dots, I_{p2}, U_n$. Przy czym zakładamy , że rezystancja pomiędzy punktami a i b jest nieskończenie duża (przerwa) co wynika z właściwości nulatora. Schematy układu , gdy działają poszczególne źródła napięć i prądów podane zostały na Rys.4c,d,e,f,g,h . Dla tych schematów łatwo można wyznaczyć składowe napięcie U_{ab} :

$$U_{ab}^{(1)} = a_1 U_{wy} = -\frac{R_{abc}}{R_{abc} + R_s} U_{wy} \quad , \quad \text{więc} \quad a_1 = -\frac{R_{abc}}{R_{abc} + R_s} \quad (31)$$

$$U_{ab}^{(2)} = b_2 U_a = -\frac{U_a}{R_a} R_{abcs} \quad , \quad b_2 = -\frac{R_{abcs}}{R_a} \quad (32)$$

$$U_{ab}^{(3)} = b_3 U_b = -\frac{U_b}{R_b} R_{abcs} \quad , \quad b_3 = -\frac{R_{abcs}}{R_b} \quad (33)$$

$$U_{ab}^{(4)} = b_4 U_c = -\frac{U_c}{R_c} R_{abcs} \quad , \quad b_4 = -\frac{R_{abcs}}{R_c} \quad (34)$$

$$U_{ab}^{(5)} = b_5 I_{p1} = -R_{abcs} I_{p1} \quad , \quad b_5 = -R_{abcs} \quad (35)$$

$$U_{ab}^{(6)} = b_6 I_{p2} = R_{abcs} I_{p2} \quad , \quad b_6 = R_{abcs} \quad (36)$$

Bez trudu też zauważymy, że jeżeli na schemacie Rys.4b wszystkie źródła mają wartości zerowe za wyjątkiem U_n to

$$U_{ab}^{(7)} = b_7 U_n = -U_n, \quad b_7 = -1 \quad (37)$$

Poszukiwaną zależność napięcia wyjściowego wzmacniacza U_{wy} od sygnałów i parametrów układu znajdziemy przekształcając równania (29) i (30) oraz podstawiając otrzymane wyrażenia na poszczególne współczynniki. Otrzymamy ostatecznie:

$$U_{wy} = -\frac{R_s}{R_a} U_a - \frac{R_s}{R_b} U_b - \frac{R_s}{R_c} U_c - R_s (I_{p1} - I_{p2}) - \frac{R_{abc} + R_s}{R_{abc}} U_n. \quad (39)$$

Pierwsze trzy składniki mówią o zależności sygnału wyjściowego od sygnałów wejściowych, pozostałe składniki mówią o zależności sygnału wyjściowego od parametrów wzmacniacza monolitycznego.

3.3.2. Układ integratora

Schemat integratora został podany na Rys.5a. Schemat zastępczy układu wykorzystujący uproszczony schemat zastępczy wzmacniacza monolitycznego podany jest na Rys.5b. Ponieważ sygnały integratora nie będą sygnałami stałymi ale funkcjami czasu, analiza układu zostanie przeprowadzona przy wykorzystaniu rachunku operatorowego stosującego przekształcenie Laplace'a [9].

Napięcie na zaciskach nulatora oznaczonych a, b może być zgonie ze wzorem (23) opisane równaniami:

$$U_{ab} = a_1 U_{wy}(s) + b_1 [I_{we}(s) - \frac{I_{p2}}{s}] + b_2 \frac{I_{p1}}{s} + b_3 \frac{U_n}{s} \quad (40)$$

$$U_{ab} = 0 \quad (41)$$

W celu wyznaczenia współczynników a_1, b_1, b_2, b_3 dokonamy analizy układu metodą superpozycji. Dla uproszczenia przyjmiemy dla napięcia na kondensatorze warunki początkowe $U_{C0} = 0$.

Schematy układu gdy działają poszczególne źródła napięcia i prądów podane zostały na Rys.5c, d, e, f. Dla tych schematów zostaną wyznaczone składowe napięcia U_{ab} :

$$U_{ab}^{(1)} = a_1 U_{wy}(s) = -U_{wy}(s), \quad a_1 = -1 \quad (42)$$

$$U_{ab}^{(2)} = b_1 [I_{we}(s) - \frac{I_{p2}}{s}] = -\frac{1}{sC} [I_{we}(s) - \frac{I_{p2}}{s}], \quad b_1 = -\frac{1}{sC} \quad (43)$$

$$U_{ab}^{(3)} = b_2 \frac{I_{p1}}{s} = 0, \quad b_2 = 0 \quad (44)$$

$$U_{ab}^{(4)} = b_3 \frac{U_n}{s} = -\frac{U_n}{s}, \quad b_3 = -1. \quad (45)$$

Poszukiwana zależność transformaty napięcia wyjściowego wzmacniacza U_{wy} od sygnałów wymuszających i parametrów układu wyrazi się wzorem:

$$U_{wy}(s) = -\frac{1}{sC} I_{we}(s) + \frac{1}{s^2 C} I_{p2} - \frac{U_n}{s} \quad (46)$$

Transformata odwrotna tego wyrażenia dla zerowych warunków początkowych na kondensatorze pozwoli wyznaczać zależności czasowe sygnału napięcia wyjściowego integratora od sygnału wejściowego i parametrów układu :

$$U_{wy}(t) = -\frac{1}{C} \int_0^t I_{we}(\tau) d\tau + \frac{I_{p2} t}{C} - U_n \quad (47)$$

Pierwszy składnik mówi o zależności napięcia wyjściowego od sygnału wejściowego integratora . Dwa dalsze składniki podają zależność napięcia wyjściowego integratora od parametrów wzmacniacza .

3.3.3. Układ źródła napięć wzorcowych

Schemat układu źródła napięć wzorcowych został podany na Rys.6a . Schemat zastępczy tego układu jest podany na Rys.6b , przy czym założono , że pomijalne są źródła prądów polaryzacji.

Napięcia na zaciskach a b nulatora n1 oraz na zaciskach c d nulatora n2 mogą być zgodnie ze wzorami (23) opisane równaniami :

$$U_{ab} = a_{11}U_{wy1} + a_{12}U_{wy2} + b_{11}(U_r - U_{n1}) + b_{12}U_{n2} \quad (48)$$

$$U_{ab} = 0 \quad (49)$$

$$U_{cd} = a_{21}U_{wy1} + a_{22}U_{wy2} + b_{21}(U_r - U_{n1}) + b_{22}U_{n2} \quad (50)$$

$$U_{cd} = 0 \quad (51)$$

W celu wyznaczenia współczynników $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{22}$ oraz $b_{11}, b_{12}, \dots, b_{22}$ dokonamy analizy układu metodą superpozycji.

Schematy układu do wyznaczania współczynników równania (48) , gdy działają poszczególne źródła napięć zostały podane na Rys.7a,b,c,d,e,f,g,h.

Schematy układu do wyznaczania współczynników równania (50) , gdy działają poszczególne źródła napięć zostały podane na Rys.8a,b,c,d,e,f,g,h.

Dla tych schematów wyznaczono poszczególne składowe napięcia $U_{ab}^{(1)}, U_{ab}^{(2)}, U_{ab}^{(3)}, U_{ab}^{(4)}$ oraz $U_{cd}^{(1)}, U_{cd}^{(2)}, U_{cd}^{(3)}, U_{cd}^{(4)}$.

$$U_{ab}^{(1)} = a_{11}U_{wy1} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{wy1}, \quad a_{11} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (52)$$

16

$$U_{ab}^{(2)} = a_{12}U_{wy2} = 0 \quad , a_{12} = 0 \quad (53)$$

$$U_{ab}^{(3)} = b_{11}(U_r - U_{nl}) = U_r - U_{nl} \quad , b_{11} = 1 \quad (54)$$

$$U_{ab}^{(4)} = b_{12}U_{n2} = 0 \quad , b_{12} = 0 \quad (55)$$

$$U_{cd}^{(1)} = a_{21}U_{wy1} = \frac{R_3}{R_3 + R_4}U_{wy1} \quad , a_{21} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad (56)$$

$$U_{cd}^{(2)} = a_{22}U_{wy2} = -U_{wy2} \quad , a_{22} = -1 \quad (57)$$

$$U_{cd}^{(3)} = b_{21}(U_r - U_{nl}) = 0 \quad , b_{21} = 0 \quad (58)$$

$$U_{cd}^{(4)} = b_{22}U_{n2} = -U_{n2} \quad , b_{22} = -1 \quad (59)$$

Równania (48) i (49) oraz (50) i (51) po przekształceniach można zapisać w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -(U_r - U_{nl}) \\ -U_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{wy1} \\ U_{wy2} \end{bmatrix} \quad (60)$$

lub w postaci uproszczonej:

$$[b] [-U] = [a] [U_{wy}] \quad (61)$$

Mnożąc lewostronnie równanie (61) przez macierz odwrotną $[a]^{-1}$ otrzymamy:

$$[U_{wy}] = [a]^{-1} [b] [-U] \quad (62)$$

Wykorzystując określone wzorami od (52) do (59) wartości współczynników można zapisać poszczególne macierze :

$$[b] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} ; \quad [a] = \begin{bmatrix} \frac{-R_1}{R_1 + R_2} & 0 \\ \frac{R_3}{R_3 + R_4} & -1 \end{bmatrix} \quad (64)$$

Można teraz wyznaczyć macierz odwrotną do macierzy $[a]$ zapisując macierz transponowaną :

$$[a]_r = \begin{bmatrix} \frac{-R_1}{R_1 + R_2} & \frac{R_3}{R_3 + R_4} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} , \quad (65)$$

oraz macierz dołączoną :

$$[a]_d = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -R_3 & -R_4 \\ R_3 + R_4 & R_1 + R_2 \end{bmatrix} \quad (66)$$

oraz wyznacznik charakterystyczny macierzy $[a]$:

$$\Delta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (67)$$

Macierz odwrotna do macierzy $[a]$ będzie miała postać :

$$[a]^{-1} = \frac{1}{\Delta} [a]_d = \begin{bmatrix} -\frac{R_1 + R_2}{R_1} & 0 \\ \frac{(R_1 + R_2)R_3}{R_1(R_3 + R_4)} & -1 \end{bmatrix} \quad (68)$$

Teraz , więc poszukiwana macierz napięć wyjściowych $[U_{wy}]$ może być wyznaczona ze wzoru (62) :

$$[U_{wy}] = \begin{bmatrix} \frac{R_1 + R_2}{R_1} (U_r - U_{n1}) \\ \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_3 + R_4} (U_r - U_{n1}) - U_{n2} \end{bmatrix} \quad (69)$$

Wypiszemy wzory na poszczególne napięcia wyjściowe :

$$U_{wy1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} (U_r - U_{n1}) \quad (70)$$

$$U_{wy2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_3 + R_4} (U_r - U_{n1}) - U_{n2} \quad (71)$$

Otrzymane równania (70) i (71) podają zależność sygnałów źródła napięć wzorcowych o schemacie podanym na Rys.6a od napięcia referencyjnego U_r oraz napięć niezrównoważenia U_{n1} i U_{n2} wzmacniaczy monolitycznych .

4. Analiza błędów przykładowego układu źródła napięć wzorcowych

Do analizy wybrano układ źródła napięć wzorcowych [10] ADZ-2A o uproszczonym schemacie podanym na Rys.6a , a którego schemat zastępczy podano na Rys.6b. Układ ten wytwarza dwa napięcia wzorcowe:

$$U_{wy1} = 10V \quad \text{o błędzie podstawowym } 60 \text{ ppm} \quad (72)$$

$$U_{wy2} = 1V \quad \text{o błędzie podstawowym } 60 \text{ ppm} . \quad (73)$$

Błędy dodatkowe układu według publikacji [10] zostały określone w sposób następujący:

$$\text{błąd temperaturowy} \leq 10 \text{ ppm} / ^\circ C \quad (74)$$

$$\text{błąd zmian napięcia zasilania} \leq 10 \text{ ppm} / 8V . \quad (75)$$

Wyżej podane dokładności zostały potwierdzone badaniami wykonanymi w listopadzie 1994 roku i podanymi w sprawozdaniu nr rej.7156 [11].

Napięcie wyjściowe źródła wzorcowego opisane są równaniami (70) i (71) . W układach tego źródła jako rezystory R_1, R_2, R_3, R_4 zastosowano tzw. rezystory precyzyjne typu RM67 produkcji firmy INCO-PYSKOWICE o stabilności długoczasowej wartości rezystancji :

$$\Delta R \leq 10 \text{ ppm} / \text{rok} \quad (76)$$

oraz o błędach temperaturowych rezystancji :

$$\frac{\Delta R}{R} \leq 2 \text{ ppm} / ^\circ C . \quad (77)$$

Z tego też względu można zaniedbywać wpływ zmian tych parametrów na błędy napięć wyjściowych.

Tak , więc o błędach napięć wyjściowych źródła napięć wzorcowych będą decydować następujące czynniki :

- błędy napięcia referencyjnego U_r ,

- dryfty napięcia niezrównoważenia wzmacniaczy monolitycznych.

Należy zwrócić uwagę , że ze względu na zastosowanie w układzie źródła napięć wzorcowych nowoczesnych wzmacniaczy monolitycznych OP-07 C o bardzo małych dryftach prądów polaryzacji ($\leq 18 \text{ pA} / ^\circ C$) i małych -rzędu $1 \text{ k}\Omega$ rezystancjach zastępczych układu (rezystancjach "widzianych z końcówek wzmacniacza") efekty dryftów prądów polaryzacji wzmacniaczy są pomijalne w stosunku do efektu dryftów napięcia niezrównoważenia.

Jako źródło napięcia referencyjnego w układzie zastosowano diodę referencyjną 1N937A o napięciu nominalnym 9V , której podstawowe błędy [12] można określić w sposób następujący :

$$\text{błąd długoczasowy (niekumulacyjny)} \quad \frac{\Delta U_r}{U_r \Delta t} \leq 10 \text{ ppm} / \text{rok} \quad (78)$$

$$\text{błąd temperaturowy} \quad \frac{\Delta U_r}{U_r \Delta T} \leq 5 \text{ ppm}/^\circ\text{C} \quad (79)$$

Jako wzmacniacze monolityczne w układzie źródła zastosowano układy monolityczne OP-07C, których dryfty napięcia niezrównoważenia wg. katalogu firmy Analog Devices są specyfikowane w sposób następujący:

$$\text{dryft długoczasowy napięcia niezrównoważenia } \Delta U_{nt} / \Delta t \leq 2 \mu\text{V} / \text{miesiac} \quad (80)$$

$$\text{dryft temperaturowy napięcia niezrównoważenia } \Delta U_{nT} / \Delta T \leq 1,8 \mu\text{V} / ^\circ\text{C} \quad (81)$$

współczynnik tłumienia zmian napięcia zasilania od 2 x 3V do 2 x 18V

$$WTNZ_{\log} \leq 100\text{dB} .$$

Z wartości współczynnika $WTNZ_{\log}$ można według wzoru (13b) wyliczyć zmianę napięcia niezrównoważenia :

$$\frac{\Delta U_{nz}}{\Delta U_z} \leq 10 \mu\text{V} / \text{V} \quad (82)$$

Błąd podstawowy źródła 10V

Napięcie wyjściowe tego źródła opisuje wzór :

$$U_{wy1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_r - \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_{n1} \quad (83)$$

Iloraz rezystancji R_2 / R_1 ma wartość 0,11, a więc :

$$U_{wy1} = 1,11 U_r - 1,11 U_{n1} \quad (84)$$

Różniczkując wyrażenie (84) po czasie t i przechodząc do przyrostów skończonych otrzymamy wzór na błąd czasowy napięcia U_{wy1} :

$$\frac{\Delta U_{wy1}}{\Delta t} = \pm 1,11 \frac{\Delta U_r}{\Delta t} \mp 1,11 \frac{\Delta U_{n1t}}{\Delta t} \quad (85)$$

Z zależności (78) oraz (80) wyliczamy błędy graniczne :

$$\frac{\Delta U_r}{\Delta t} \leq 90 \mu\text{V} / \text{rok} \quad (86)$$

$$\frac{\Delta U_{n1}}{\Delta t} = \frac{\Delta U_{n2}}{\Delta t} \leq 24 \mu\text{V} / \text{rok} \quad (87)$$

Stąd

$$\frac{\Delta U_{wy1}}{\Delta t} = \pm 126 \mu\text{V} / \text{rok}$$

oraz błąd względny :

$$\frac{\Delta U_{wy1}}{U_{wy1} \Delta t} = \pm 13 \text{ ppm} / \text{rok} \quad (88)$$

Z analizy wynika, że błąd podstawowy dla napięcia wzorcowego 10V (60 ppm/rok) jest deklarowany z rezerwą w stosunku do wyliczonego błędu granicznego długoczasowego w ciągu roku.

Błąd podstawowy źródła 1V

Napięcie wyjściowe tego źródła określa wzór:

$$U_{wy2} = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_4}{R_3}} U_r - \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_4}{R_3}} U_{n1} - U_{n2} \quad (89)$$

Ponieważ $\frac{R_4}{R_3}$ jest wielokrotnie większy od jedności, to wzór (89) można przedstawić w postaci przybliżonej łatwiejszej do analizy błędów:

$$U_{wy2} \cong 1,11 \frac{R_3}{R_4} U_r - 1,11 \frac{R_3}{R_4} U_{n1} - U_{n2} \quad (90)$$

przy czym należy przyjmować wartość :

$$\frac{R_3}{R_4} = 0.1 \quad (91)$$

Różniczkując wyrażenie (90) po czasie t i przechodząc do przyrostów skończonych oraz odrzucając składniki pomijalne otrzymamy wzór na błąd długoczasowy napięcia U_{wy2} :

$$\frac{\Delta U_{wy2}}{\Delta t} = \pm 1,11 \frac{R_3}{R_4} U_r \frac{\Delta R_3}{R_3 \Delta t} \mp 1,11 \frac{R_3}{R_4} U_r \frac{\Delta R_4}{R_4 \Delta t} \pm 1,11 \frac{R_3}{R_4} \frac{U_r \Delta U_r}{U_r \Delta t} \mp 1,11 \frac{R_3}{R_4} \frac{\Delta U_{n1}}{\Delta t} \mp \frac{\Delta U_{n2}}{\Delta t} \quad (92)$$

Podstawiając wartości graniczne według (76), (86), (87) oraz (91) otrzymamy:

$$\frac{\Delta U_{wy2}}{\Delta t} = \pm 57 \mu V / rok \quad (93)$$

oraz błąd względny :

$$\frac{\Delta U_{wy2}}{U_{wy2} \Delta t} = \pm 57 \text{ ppm} / rok \quad (94)$$

Z analizy tej wynika, że błąd podstawowy dla napięcia wzorcowego 1V (60 ppm/rok) jest deklarowany z rezerwą w stosunku do wyliczonego błędu granicznego długoczasowego w ciągu roku.

Błąd dodatkowy temperaturowy źródła napięcia 10V

Błąd temperaturowy wyrazić można analogicznym wzorem do zależności (85):

$$\frac{\Delta U_{wy1}}{\Delta T} = \pm 1,11 \frac{\Delta U_r}{\Delta T} \mp 1,11 \frac{\Delta U_{n1T}}{\Delta T} \quad (95)$$

Z zależności (79) oraz (81) określimy błędy graniczne :

$$\frac{\Delta U_r}{\Delta T} \leq 45 \mu V / ^\circ C \quad (96)$$

$$\frac{\Delta U_{n1T}}{\Delta T} = \frac{\Delta U_{n2T}}{\Delta T} \leq 1,8 \mu V / ^\circ C . \quad (97)$$

Stąd wyliczamy błąd dodatkowy od temperatury :

$$\frac{\Delta U_{wy1}}{\Delta T} = \pm 47 \mu V / ^\circ C \quad (98)$$

oraz błąd względny :

$$\frac{\Delta U_{wy1}}{U_{wy1} \Delta T} = 5 \text{ ppm} / ^\circ C . \quad (99)$$

Z analizy wynika , że błąd dodatkowy od temperatury dla napięcia wzorcowego 10V (10 ppm/ $^\circ C$) jest deklarowany z rezerwą w stosunku do wyliczonego błędu granicznego temperaturowego.

Błąd dodatkowy temperaturowy źródła napięcia 1V

Błąd temperaturowy wyrazi się analogicznym wzorem do (92)

$$\frac{\Delta U_{wy2}}{\Delta T} = \pm 1,11 \frac{R_3}{R_4} U_r \frac{\Delta R_3}{R_3 \Delta T} \mp 1,11 \frac{R_3}{R_4} U_r \frac{\Delta R_4}{R_4 \Delta T} \pm 1,11 \frac{R_3}{R_4} \frac{U_r}{U_r} \frac{\Delta U_r}{\Delta T} \mp 1,11 \frac{R_3}{R_4} \frac{\Delta U_{n1}}{\Delta T} \mp \frac{\Delta U_{n2}}{\Delta T} \quad (100)$$

Podstawiając wartości graniczne (77) , (96) , (97) otrzymamy :

$$\frac{\Delta U_{wy2}}{\Delta T} = \pm 11 \mu V / ^\circ C \quad (101)$$

oraz względny błąd graniczny :

$$\frac{\Delta U_{wy2}}{U_{wy2} \Delta T} = \pm 11 \text{ ppm} / ^\circ C . \quad (102)$$

Z analizy wynika , że błąd dodatkowy od temperatury deklarowany dla źródła napięcia 1V (10 ppm/ $^\circ C$) jest nieco mniejszy od wyliczonego błędu granicznego (11 ppm/ $^\circ C$) . Prawdopodobieństwo wystąpienia błędu granicznego jest jednak bardzo małe a prawdopodobny błąd średniokwadratowy wynosi 6 ppm/ $^\circ C$, toteż można uznać błąd dodatkowy deklarowany za właściwy .

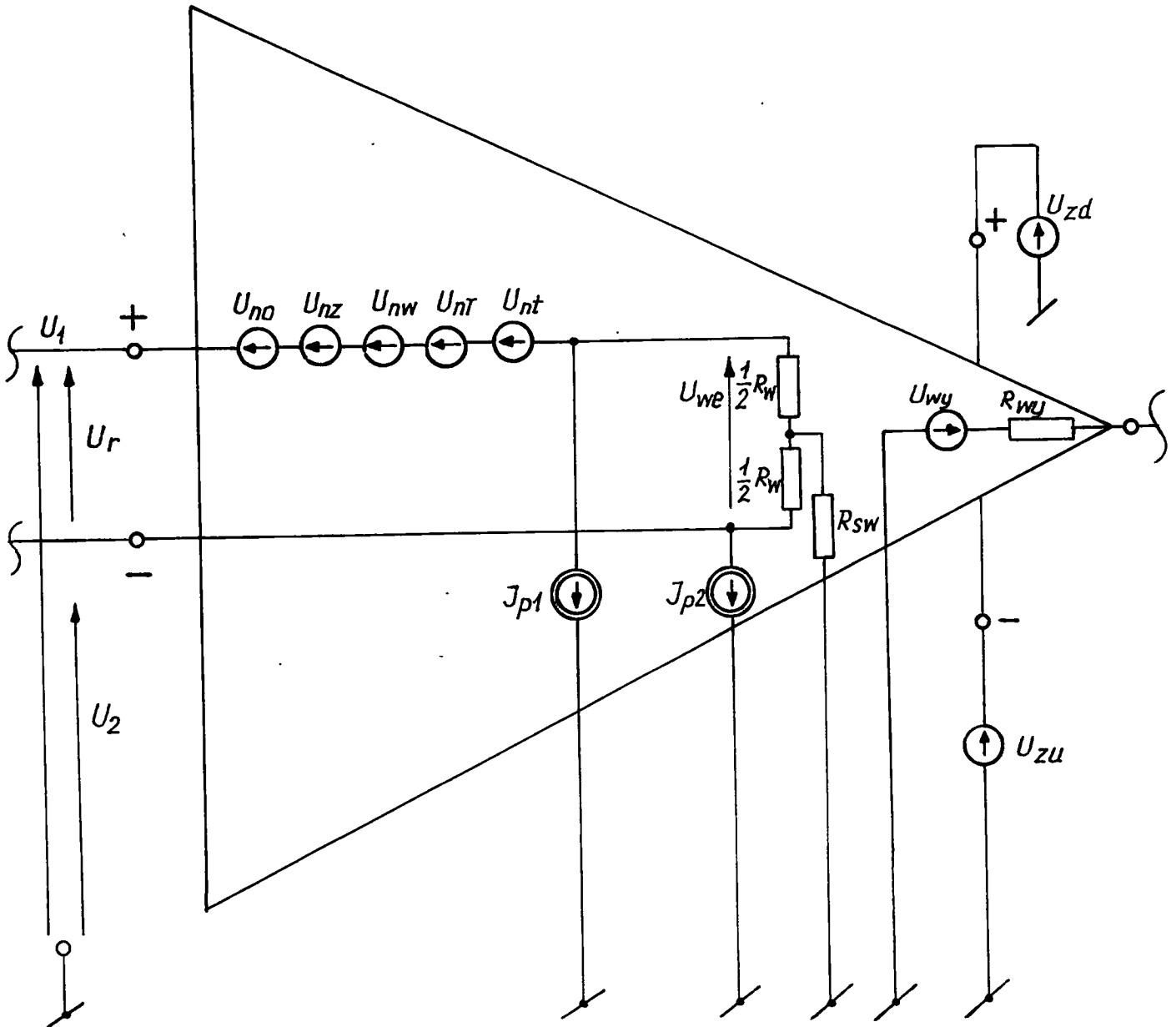
Analiza błędu dodatkowego od zmiany napięcia zasilania dla źródła 10V i 1V jest niecelowa , gdyż wzmacniacze monolityczne w układzie źródła wzorcowego zasilane są napięciem stabilizowanym [11] , toteż efekty zmiany napięcia zasilania całego układu na napięcia niezrównoważenia ΔU_{n12} i ΔU_{n22} są niezauważalne.

5. Zakończenie

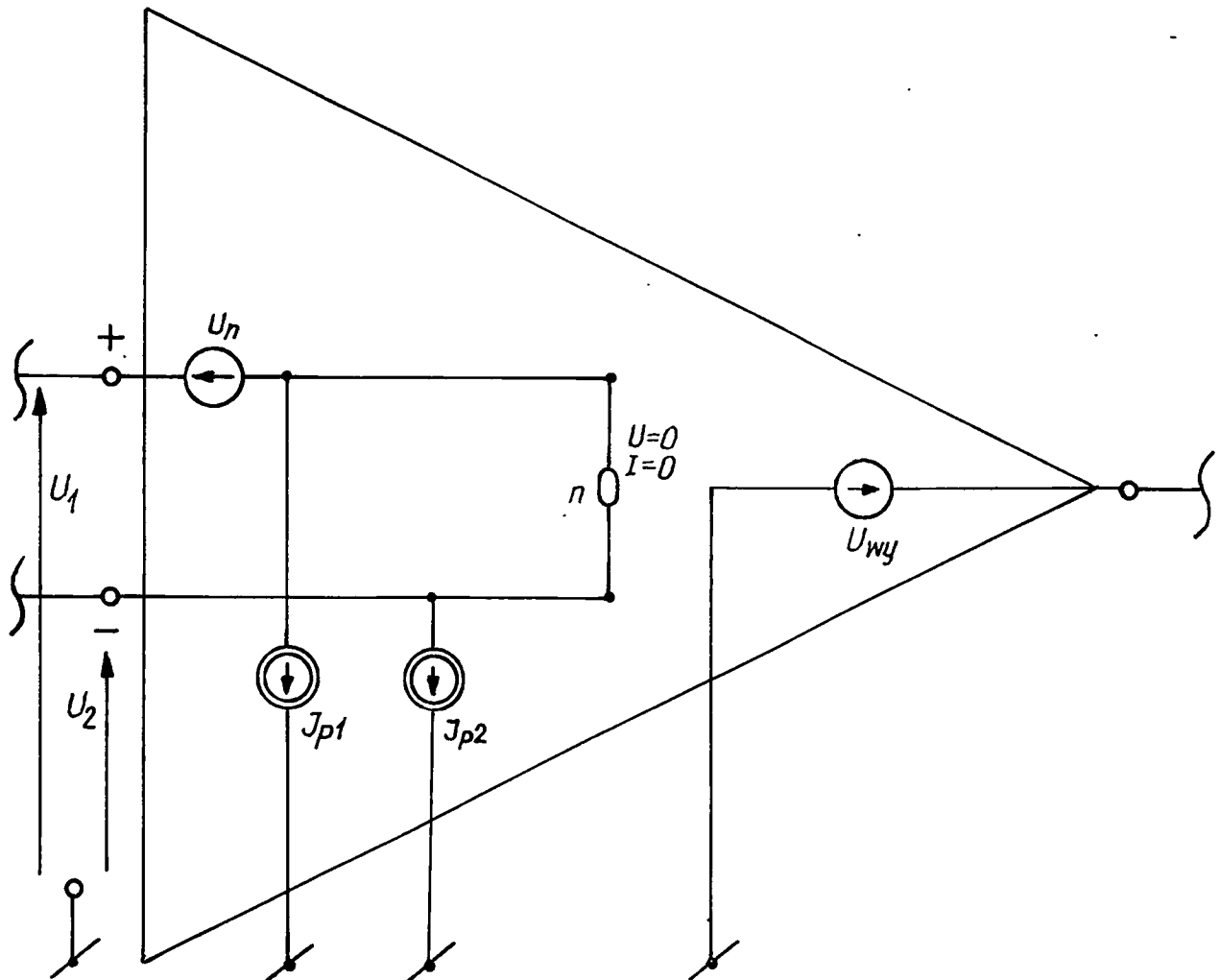
Przedstawiona w pracy uproszczona metoda analizy sygnałów układów elektronicznych ze wzmacniaczami monolitycznymi jest przydatna dla projektantów układów a zilustrowany przykładem sposób wyznaczania błędów tych sygnałów jest wygodny. Przedstawiona w pracy analiza błędów dla przykładowego układu elektronicznego dała wyniki zbieżne z wynikami uzyskanymi z badań eksperymentalnych [11].

6. Literatura

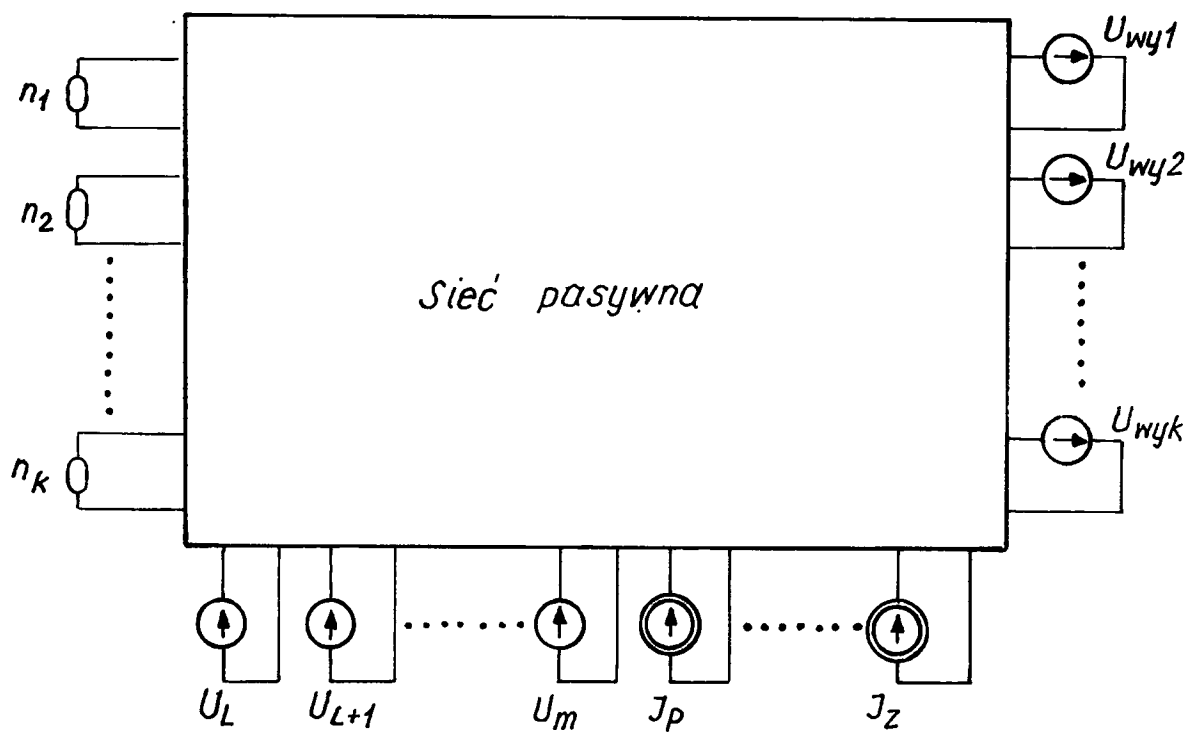
- [1] J.R.Ragazzini , R.H.Randall , F.A. Russell : Analysis of Problems in Dynamics by Electronic Circuits. Proc.IRE . May 1947.
- [2] L.I.Bajda , A.A.Siemenkiewicz : Elektroniczne wzmacniacze prądu stałego . Państwowe Wydawnictwa Techniczne . Warszawa 1956 r.
- [3] J.Korytkowski , J.Harasimowicz : Uniwersalny przetwornik nieliniowy z układami diodowymi o nowej strukturze . Pomiar , Automatyka , Kontrola . Nr 1 styczeń 1968 r.
- [4] J.Korytkowski , J.Orlański : Przetwornik cyfrowo-analogowy w układzie wzmacniacza z cyfrowo sterowaną konduktancją sprzężenia zwrotnego . Pomiar , Automatyka , Kontrola . Nr 5 1971 r.
- [5] J.Harasimowicz : Wzmacniacz prądu stałego z układem scalonym . Pomiar , Automatyka , Kontrola . Nr 7 1969 r.
- [6] J.Harasimowicz : Przegląd monolitycznych wzmacniaczy operacyjnych . Elektronika . Nr 11 1972 r.
- [7] L.Spiralski , J.Koldziejski : Miernictwo układów scalonych . Wydawnictwa Komunikacji i Łączności . Warszawa 1979 r.
- [8] T.Cholewicki : Metody obliczania obwodów elektrycznych . Państwowe Wydawnictwa Techniczne . Warszawa 1959 r.
- [9] M.J.Kontorowicz : Rachunek operatorowy i stany nieustalone w obwodach elektrycznych. Państwowe Wydawnictwa Techniczne . Warszawa 1956 r.
- [10] J.Korytkowski : Elektroniczne źródło napięć wzorcowych zwiększa dokładność pomiarów napięć stałych . Wiadomości Elektrotechniczne . Rok LIII . 1985 Nr 7 - 8 .
- [11] J.Korytkowski : Et.1 Wykonanie i badanie modelowego układu źródła napięć wzorcowych z wykorzystaniem nowoczesnych wzmacniaczy monolitycznych . Praca niepublikowana , sprawozdanie PIAP nr archiwalny 7156 . Warszawa listopad 1994 r.
- [12] J.Korytkowski : Badania długotrwałej stabilności napięcia nowych diod referencyjnych produkcji krajowej . Pomiar , Automatyka , Kontrola . Nr 10 1985 rok.



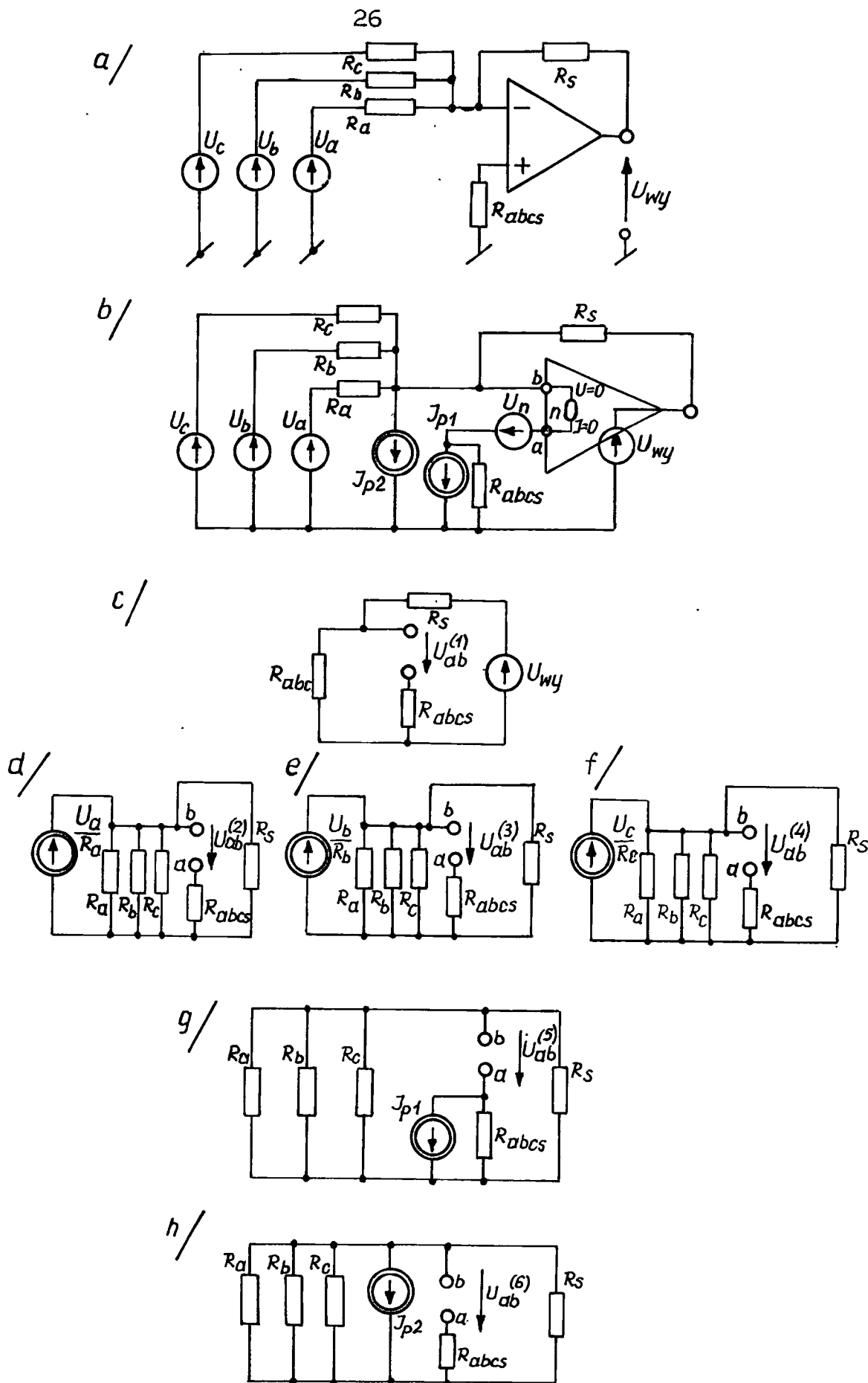
Rys.1 Schemat zastępczy wzmacniacza



Rys.2 Uproszczony schemat zastępczy wzmacniacza



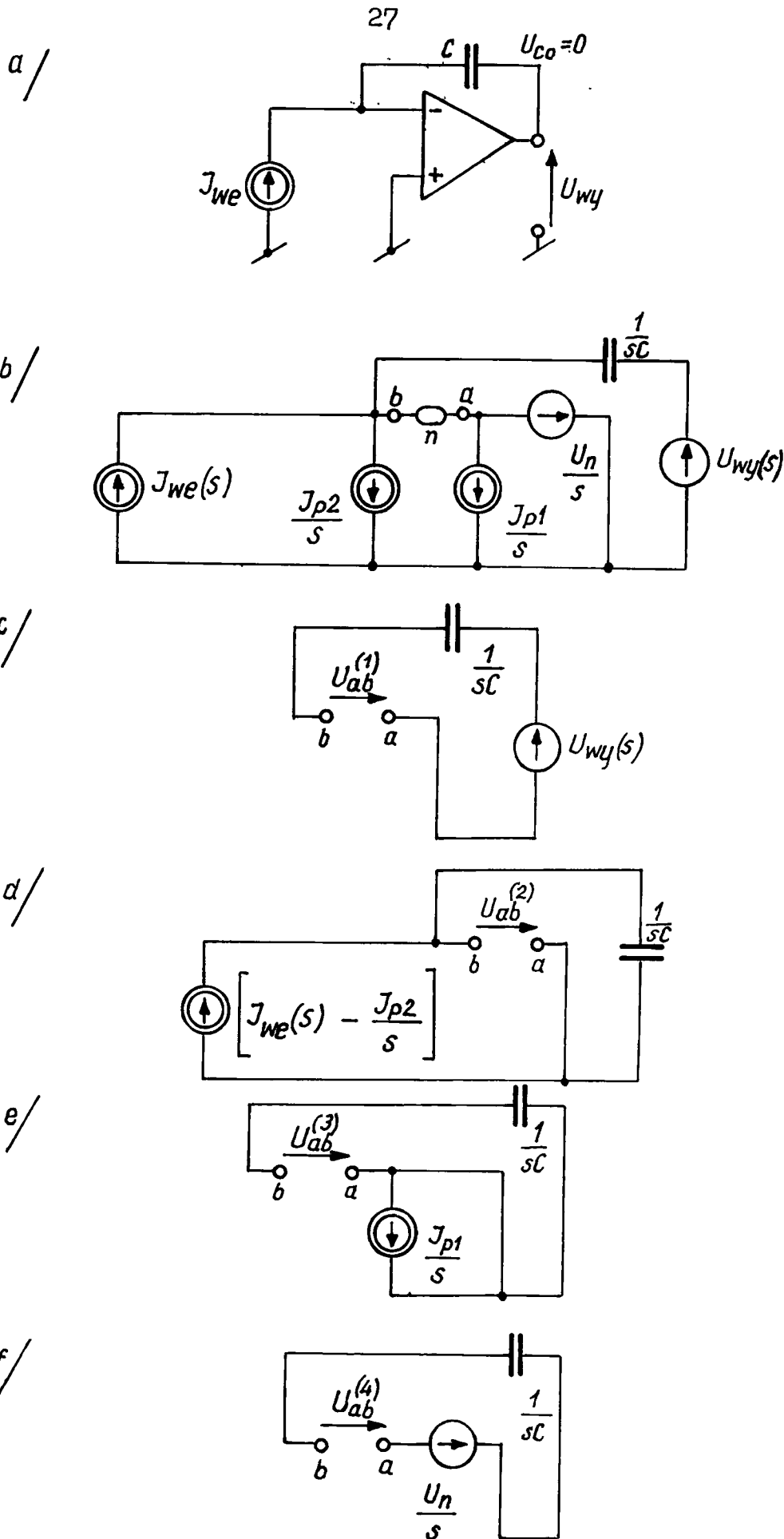
Rys.3 Schemat zastępczy układu z liczbą k wzmacniaczy do analizy układu metodą zerowych napięć wejściowych wzmacniaczy



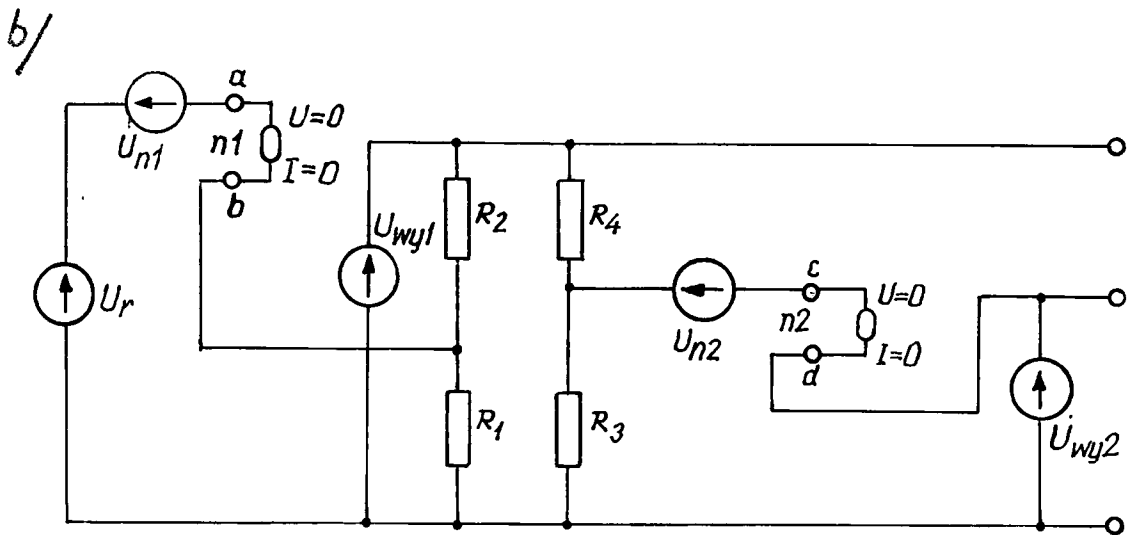
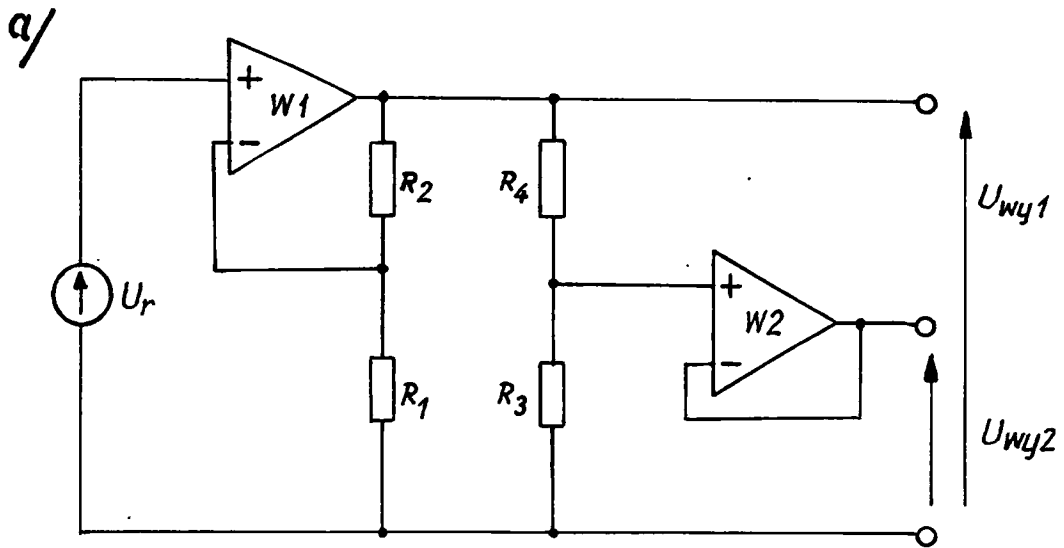
Rys.4 Wzmacniacz sumujący

a- schemat

b,c,d,e,f,g,h- schematy zastępcze



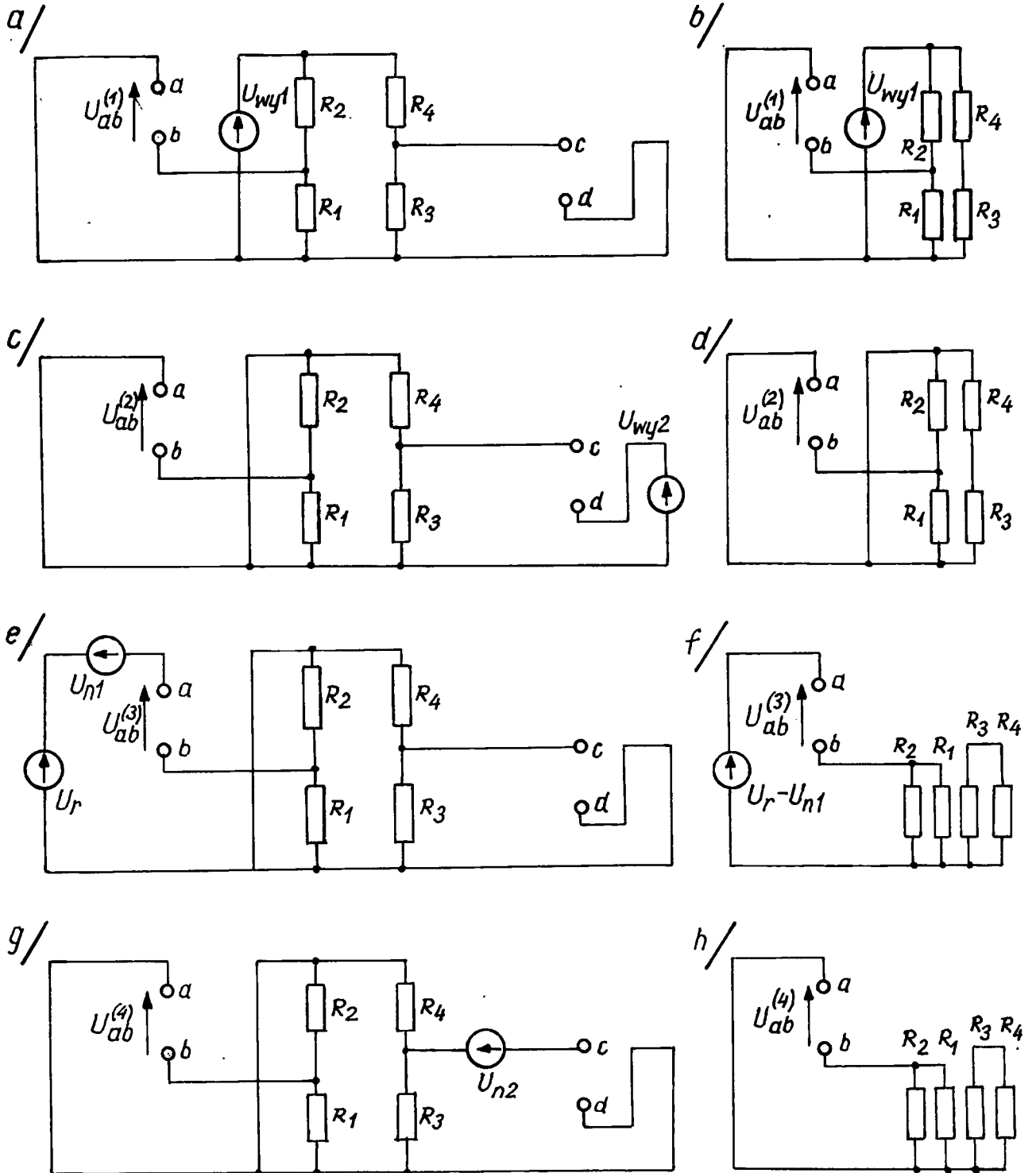
Rys.5 Integrator : a - schemat integratora
 b,c,d,e,f- schematy zastepcze układu



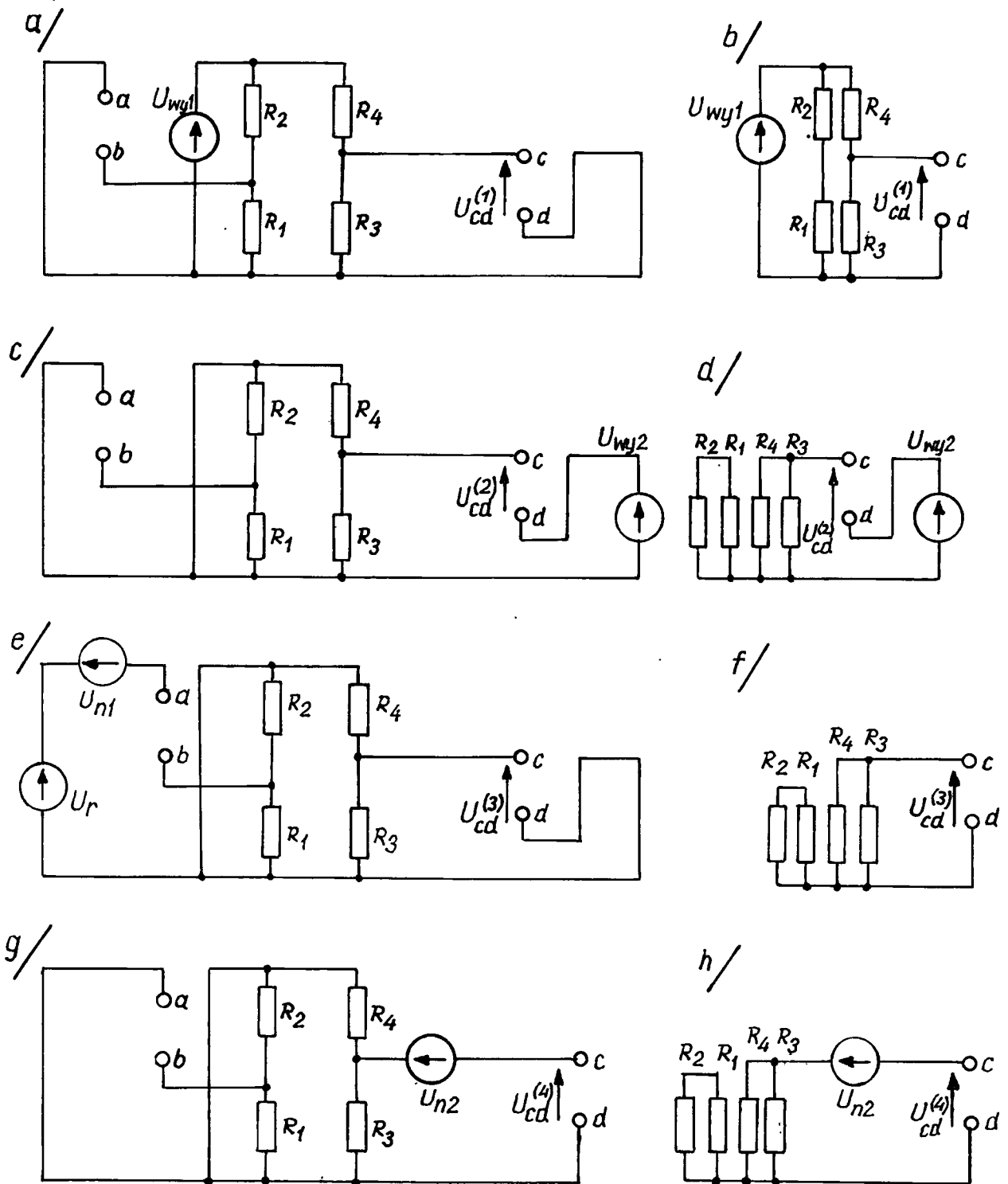
Rys.6 Układ źródeł napięć wzorcowych

a- schemat układu

b- schemat zastępczy



Rys.7 Schematy układu źródła napięć wzorcowych
do analizy metodą superpozycji



Rys.8 Schematy układu źródła napięć wzorcowych
do analizy metodą superpozycji