

Pomiary elementów R i C

Dokładne pomiary elementów R i C mostkiem niezrównoważonym

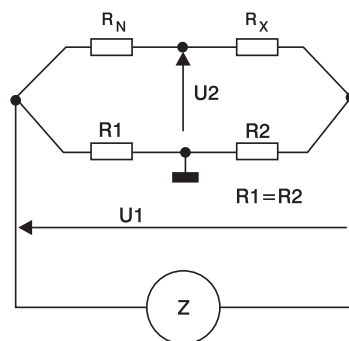
Precyzyjne rezystory można sprawdzać z dokładnością 0,01% przyrządami mierzącymi z błędem 1%. Prawda czy fałsz? Na to kwizowe pytanie odpowiedź wydaje się oczywista. To nawet nie fałsz, ale absurd! Błąd pomiaru jest 100 razy większy od żądanej dokładności! Jednak jak można przekonać się czytając ten artykuł, takie rozumowanie nie musi być zgodne z prawdą.

Na początek, tytułem wprowadzenia, przykład z innej branży. Do sprawdzania długości mamy kilkadziesiąt prętów około dwumetrowych, które nie powinny różnić się od pręta wzorcowego o więcej niż o ± 5 mm, czyli $\pm 0,25\%$, przy czym dopuszczamy niedokładność pomiaru 1 mm. Sprawdzanie można przeprowadzać mierząc pręt wzorcowy, a następnie kolejne pręty przy pomocy miarki, której dokładność powinna wynosić ok. $100 \times 1/2000 = 0,05\%$. Długość prętów można jednak sprawdzać również inaczej.

Do pręta uznanego za wzorcowy przystawiamy sprawdzany i mierzymy różnicę między nimi przy pomocy nieporównywalnie mniej dokładnego narzędzia, którego błąd pomiaru może sięgać 10%! Często można nawet stwierdzić „na oko”, że długość badanego pręta mieści się w granicach tolerancji. W ten sposób osiągamy zamierzony cel i dowiadujemy się o ile badany egzemplarz różni się od wzorca, natomiast jaka jest długość badanych prętów nie jest w tym przypadku informacją potrzebną. W rezultacie pomiar może być dokładniejszy, mimo posługiwania się znacznie mniej precyzyjnymi narzędziami. Podobnie można postępować także sprawdzając elementy elektroniczne, takie jak rezystory, kondensatory, dławiki i inne. Np. w seryjnej kontroli rezystorów przyrządy zamiast o rezystancji w omach powinny informować o względnej różnicy między badanym egzemplarzem i wzorcem. Aparatura przeznaczona do kontroli wyrobów na automatycznych liniach produkcyjnych sygnalizuje tylko, czy badany egzemplarz mieści się w granicach tolerancji. Taka informacja wystarcza także w wielu innych przypadkach, a układy przeznaczone do takiego sprawdzania mogą być bardzo proste (np.

EP 2/09 str.74). Jednak często potrzebny jest analogowy lub cyfrowy wynik pomiaru, wyrażany zwykle w procentach względnej różnicy między wielkością badaną a wzorcową. Przyrządy służące do tego celu nazywane są komparatorami. W tym artykule opisywane są tylko takie komparatory, które stosują mostek niezrównoważony do porównywania elementów R, C lub L.

Na rys. 1 pokazano mostek niezrównoważony (nazywany także mostkiem odchyłowym lub mostkiem tolerancji) przeznaczony do porównywania rezystancji wzorcowej R_N i badanej R_X pokazuje rys. 1. W odróżnieniu od klasycznego mostka, w którym rezystancje są zmieniane tak, aby uzyskać zero napięcia wyjściowego, w mostku niezrównoważonym gałęzie stosunkowe są stałe. Taki mostek staje się szczególnie dobrym narzędziem w dokładnych pomiarach elementów R i C, jeśli $R_1 = R_2$. Wtedy jest w równowadze (tj. $U_2 = 0$) tylko, gdy $R_X = R_N$. Sprawdzenie, czy gałęzie stosunkowe zostały dokładnie zrównane, jest łatwe; po zamianie obu porównywanych rezystorów napięcie wyjściowe powinno różnić się tylko znakiem. Rezystancje R_1 i R_2 , chociaż mają być jednakowe,

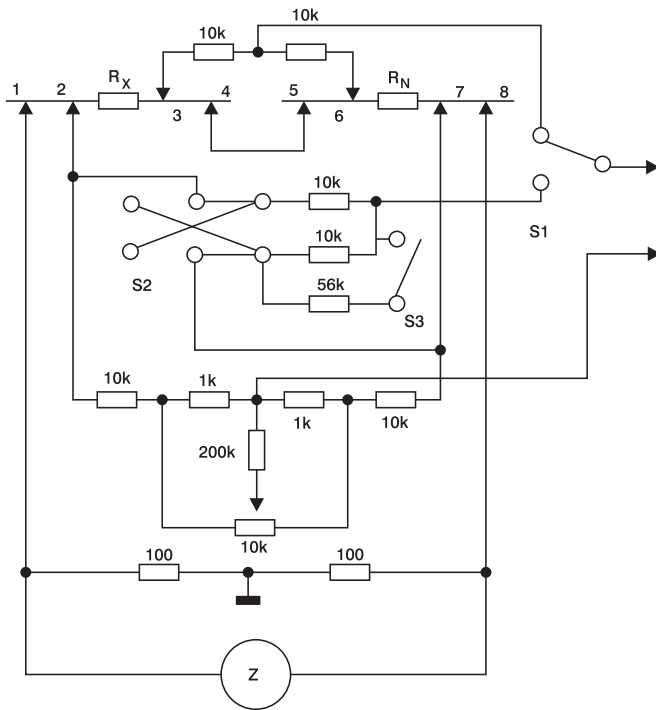


Rys. 1. Mostek niezrównoważony

nie muszą mieć dokładnie określonych wartości. Dlatego można je korygować przyłączając równolegle odpowiednie rezystory, a więc równoważenie rezystorów układu nie wymaga posługiwania się żadnymi precyzyjnymi przyrządami wzorcowymi. Te szczególne własności mostka niezrównoważonego sprawiają, że posługując się nim można bez większych problemów uzyskać największe dokładności porównania 2 rezystancji, jakie mogą być potrzebne w praktyce.

Mostek wg rys. 1 zasilany jest ze źródła Z prądu stałego lub zmiennego, a wówczas może służyć także do porównywania pojemności i indukcyjności. Rezystancja rezystora sprawdzanego różni się od wzorcowej o p procent, czyli $R_X = R_N(1 + p/100)$. Napięcie wyjściowe nieobciążonego mostka jest równe $U_2 \approx U_1 \frac{p}{400 + 2p}$.

Napięcie to po wzmocnieniu, gdy mostek jest zasilany ze źródła prądu stałego, może być mierzone np. przez przyrząd analogowy z zerem w środku skali wycechowanej w procentach. Jednak taka skala nie jest idealnie liniowa. Jeśli wskazanie ma być cyfrowe, to dla uzyskania liniowej zależności między napięciem a procentową różnicą p można np. wykorzystać przetwornik A/C z podwójnym całkowaniem. Wtedy napięcie odniesienia w przetworniku powinno być proporcjonalne do napięcia na rezystorze wzorcowym R_N , które jest różnicą napięć na rezystorze $R_1 (= \frac{1}{2}U_1)$ i wyjściowego U_2 . Jednak, gdy zakres pomiarowy różnicy procentowej p jest mały, np. 2%, to można przyjąć, że $U_2 \approx U_1 p/400$, a wzmocnione wyjściowe napięcie mostka mierzyć np. uniwersalnym popularnym miernikiem 3½-cyfrowym. Przykładowo przy napięciu zasilającym mostek $U_1 = 4$ V, 10-krotnym wzmocnieniu napięcia U_2 i przełączeniu miernika na zakres 200 mV otrzymamy zakres pomiarowy $p = 2\%$ o rozdzielczości 0,001%. Na tym zakresie błąd pomiarowy wynikający z przyjętego uproszczenia jest mały i na ogół można go pominąć. Bezpośrednie przyłączenie miernika do wyjścia mostka też mogłoby wystarczyć w wielu przypadkach (rozdzielczość 0,01%), ale nie-



Rys. 2. Mostek niezrównoważony przystosowany do porównywania małych rezystancji

stety wpływ obciążenia wyjścia mostka rezystancją 1 M Ω miernika powodowałby zauważalne błędy już przy sprawdzaniu rezystancji większych od kilkunastu k Ω . Im mniejsza jest różnica p , tym także mniejszy jest jej wpływ na rezystancję. Dlatego dopuszczalny błąd pomiaru tej różnicy przy sprawdzaniu rezystorów precyzyjnych o wąskich tolerancjach może być paradoksalnie dużo większy od maksymalnego wymaganego np. przy porównywaniu rezystorów 5%.

Jak już wspomniano, istotną zaletą układu pomiarowego wykorzystującego mostek niezrównoważony wg rys. 1 jest łatwy sposób kontroli i skorygowanie jego wskazań. Sprawdzenie stosunku gałęzi mostka $R_1/R_2 = 1$ (zera procent) można przeprowadzić przyłączając do zacisków mostka dwa rezystory o możliwie mało różniących się rezystancjach. Po odczytaniu wyniku pomiaru zamieniamy je miejscami, a uzyskane teraz wskazanie powinno różnić się tylko znakiem. Jest pożądane, aby taki układ sprawdzający równowagę mostka był częścią zestawu pomiarowego. Ponadto, przy porównywaniu rezystancji mniejszych od 100 Ω dla zapewnienia najlepszej dokładności konieczne jest zastosowanie pomiaru czterostykowego. Na rys. 2 pokazano mostek spełniający te wymagania. Spadki napięć na stykach „prądowych” 1, 4, 5 i 8 powodują zmniejszenie napięcia zasilającego mostek; mogą więc nieznacznie (na ogół pomijalnie) zmniejszyć wskazania różnicy p , ale nie wpływają na wskazanie zera. Rezystancje styków „napięciowych” są bardzo małe w porównaniu z rezystancjami dołączonymi do tych styków i praktycznie nie mają wpływu na wyniki pomiarów. Mostek został zaopatrzony w układ potrzebny

podanych na rys. 2 rezystancji napięcie to ma taką wartość, jaka powstaje, gdy procentowa różnica p wynosi $-15,15\%$ lub $+17,85\%$ zależnie od pozycji przełącznika S2. Korygując napięcie zasilające mostek lub wzmocnienie wzmacniacza trzeba uzyskać wymienione wskazania. Do wyjścia mostka powinien być dołączony różnicowy wzmacniacz pomiarowy o bardzo dużej rezystancji wejściowej.

Jest oczywiste, że rezystory gałęzi stosunkowych mostka decydujące o dokładności wskazania zera procent powinny być jednakowe o możliwie stabilnej rezystancji. Dla zminimalizowania wpływu temperatury muszą mieć mały temperaturowy współczynnik rezystancji TWR, a w przypadku rezystorów R_1 i R_2 z rys. 1 o rezystancjach kilkuset Ω także stosunkowo dużą obciążalność (np. 1 W lub więcej). Zauważmy, że jeśli TWR wynosi np. 50 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, jak to ma miejsce w standardowych rezystorach metalizowanych, to zmiana temperatury tylko o 2 $^{\circ}\text{C}$ zmieni rezystancję o 0,01%. Jednak zmiany te mogą nie wpływać na równowagę mostka, jeśli w obu gałęziach stosunkowych będą jednakowe. Przy stałym napięciu zasilającym mostek 4 V zmiana napięcia wyjściowego o 10 μV oznacza zmianę równowagi mostka o 0,001%. Dla korzystania z tak znacznej czułości układu pomiarowego nie wystarcza duża stabilność układu mostkowego, ale także konieczne jest zapobieżenie błędom wnoszonym przez pozostałe człony układu pomiarowego. Do napięcia wyjściowego ynikającego z nierównowagi mostka dodaje się wejściowe napięcie niezrównoważenia wzmacniacza, a także możliwe jest oddziaływanie napięć termoelektrycznych. Przez skorygowanie gałęzi stosunkowych mostka kompensuje

do opisanej wyżej operacji sprawdzania zera procent. Układ ten, zawierający jednakowe rezystory, łączy z wejściem wzmacniacza przełącznik S1, natomiast przełącznik S2 służy do zamiany miejscami rezystorów. Potencjometrem można dokładnie wyrównać gałęzie stosunkowe mostka. Zestykiem S3 dołącza się równolegle dodatkowy rezystor powodując zmianę równowagi układu sprawdzającego i uzyskując w ten sposób napięcie kontrolne pomocne przy regulowaniu wskazań różnicy procentowej p . Dla

się te wpływy, ale jeśli są niestabilne, zabieg ten musi być często powtarzany. Równowagę mostka może przesunąć także prąd wejściowy wzmacniacza operacyjnego, gdy badane rezystancje są duże. Zastosowanie wzmacniaczy operacyjnych z wejściem FET skutecznie temu zapobiega, ale napięcie niezrównoważenia takich wzmacniaczy jest na ogół znaczne, zwykle kilka miliwoltów. Z kolei precyzyjne wzmacniacze operacyjne mają wystarczająco małe wejściowe napięcie niezrównoważenia oraz dryft tego napięcia, lecz ich prąd wejściowy może wynosić kilka nanoamperów, a to w przypadku sprawdzania dużych rezystancji będzie powodować znaczące błędy pomiarowe. Wyeliminowanie wyżej wymienionych źródeł błędów jest możliwe przez zmiennoprądowe zasilanie mostka i zastosowanie detektora fazowego w torze wzmacnianego sygnału. Jeśli mostek ma służyć do pomiarów rezystorów lub dużych pojemności, to 100 Hz jest zalecaną częstotliwością sinusoidalnego źródła prądu. Wtedy detektor fazowy sprawia, że na jego wyjściu średnia wartość zarówno sygnałów stałoprądowych jak i zakłócających o częstotliwości sieci jest równa zeru.

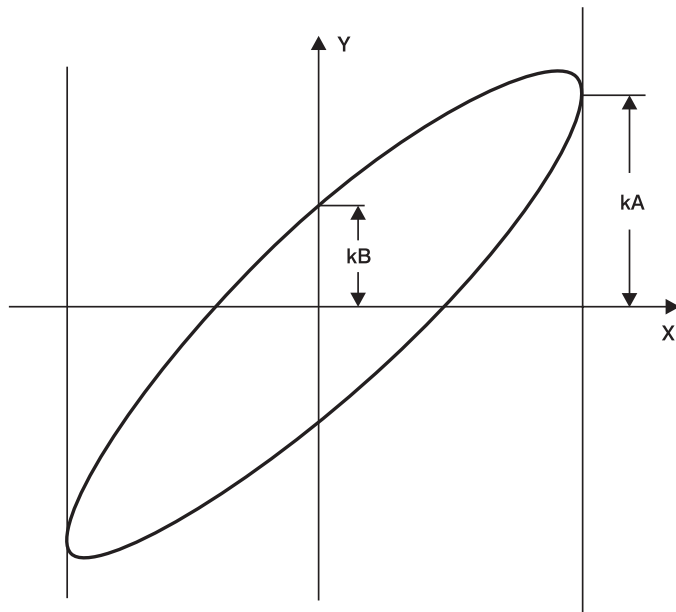
W przypadku porównywania kondensatorów napięcie wyjściowe $\hat{U}_2 = U_1(A + jB)$. W rzeczywistym kondensatorze przesunięcie fazowe między prądem i napięciem jest mniejsze od 90 $^{\circ}$ o kąt δ . Tangens tego kąta jest miarą strat w kondensatorze. Zwykle $\text{tg} < 0,01$, a wówczas

$$A \approx \frac{-P}{400 + 2p} \quad B \approx \frac{\text{tg} \delta x - \text{tg} \delta n}{4}$$

przy czym $p = 100(C_X/C_N - 1)$.

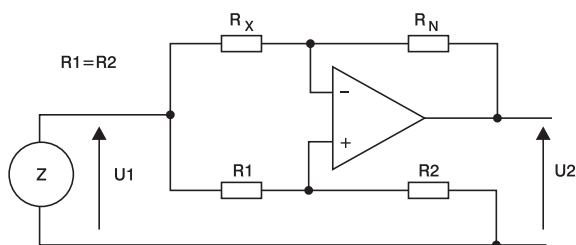
Wyrażenie A ma znak ujemny, wynika stąd, że celem wykorzystania tej samej podziałki skali p dla rezystorów i kondensatorów należy w mostku wg rys. 1 w miejsce dla rezystora R_X wstawić kondensator C_N i podobnie rezystor R_N należy zastąpić kondensatorem C_X .

W mostkach prądu zmiennego zarówno w przypadku rezystorów jak i kondensatorów może być użyty oscyloskop jako wskaźnik nierównowagi. Uzyskuje się w ten sposób dużą szybkość pomiaru. Wyjście mostka łączy się z kanałem odchylenia pionowego Y-Y oscyloskopu, natomiast sygnał proporcjonalny do napięcia zasilającego mostek służy do odchylenia w kierunku osi X-X. Chociaż dokładność takiego wskaźnika może wydawać się zbyt mała, to w rzeczywistości na ogół jest całkowicie wystarczająca. Szczególnie dotyczy to sprawdzania kondensatorów. Wtedy dla sinusoidalnego źródła zasilania mostka i znacznej różnicy strątności porównywanych kondensatorów otrzymujemy na ekranie oscyloskopu elipsę. Rys. 3 wyjaśnia, jak z takiego obrazu otrzymuje się informacje o składowych wyjściowym napięcia mostka, a więc o procentowej różnicy p oraz różnicy $\text{tg} \delta$. Zdarzają się przypadki złego styku



Rys. 3. Odczyt składowych napięcia wyjściowego mostka z ekranu oscyloskopu

między okładziną kondensatora a jego wyprowadzeniem. Taki kondensator może mieć jeszcze akceptowalną pojemność, ale staje się przyczyną niesprawności układu (np. oscylatora LC), w którym został zastosowany. Przy seryjnym sprawdzaniu kondensatorów egzemplarz wadliwy o dużym $tg\delta$ jest łatwo rozpoznawalny, gdyż wtedy pole elipsy staje się znacznie większe. Przy częstotliwości pomiarowej 1 kHz i rezystancjach sond oscyloskopu 10 MΩ zakres pomiarowy kondensatorów może wynosić od ok. 1 nF do kilku μF. Przy sprawdzaniu pojemności mniejszych częstotliwość pomiarowa powinna być większa np. 10 kHz. Jeśli napięcie zasilające mostek wynosi ok. 5,7 V, a czułość kanału Y-Y oscyloskopu 20 mV/cm, to dla $p = +1\%$ odchylenie kA wyniesie ok. 10 mm. Przy wynikającej stąd podziałce skali naniesionej na ekran oscyloskopu można osiągnąć dokładność porównywania pojemności lepszą od 0,2% szczególnie, gdy względne różnice p pojemności są małe np. nie przekraczają 2%. W pomiarach pojemności wystarczy to w zdecydowanej większości przypadków występujących w praktyce. Oprócz mostka do skompletowania takiego zestawu pomiarowego potrzebny jest jedynie generator o stabilnej lecz regulowanej amplitudzie, aby można było dostosować wskazania do skali na ekranie oscyloskopu. powinien zasilac mostek poprzez transformator, aby masy



Rys. 4. Aktywny mostek niezrównoważony

generatora i oscyloskopu mogły być ze sobą połączone.

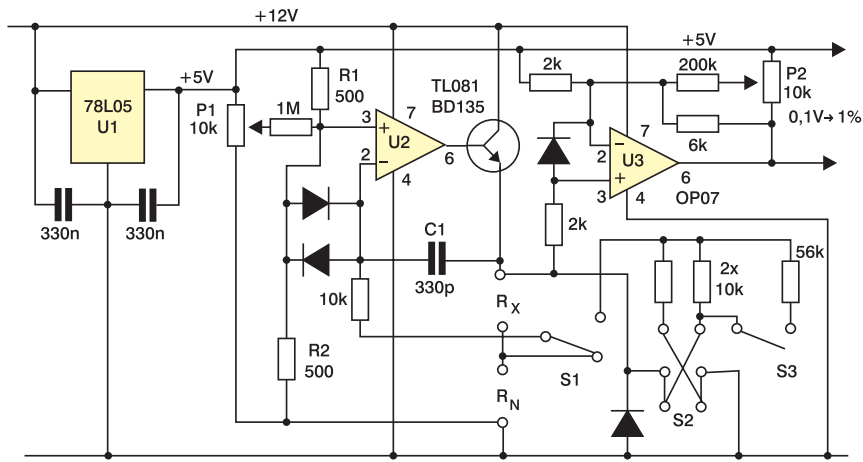
Uzyskanie liniowej zależności między napięciem wyjściowym mostka a względną różnicą rezystancji p jest możliwe przez utworzenia aktywnego mostka przy pomocy wzmacniacza operacyjnego. W takim mostku pokazanym na rys. 4 $U_2 = U_1(-p/200)$. W porównaniu z mostkiem konwencjonalnym czułość jest dwa razy większa, a ponadto rezystancja

wyjściowa mostka jest mała, więc nie ma specjalnych wymagań dla wzmacniacza przyłączanego do wyjścia mostka. Jednak na równowagę mostka wpływają parametry wejściowe wzmacniacza operacyjnego (napięcie niezrównoważenia, prąd wejściowy), a poza tym porównywane rezystancje tworzą gałąź sprzężenia zwrotnego wzmacniacza, więc w niekorzystnym przypadku, np. przy sprawdzaniu rezystorów drutowych, może to być przyczyną niestabilności układu. Wtedy niezbędne jest uzupełnienie układu o odpowiednie człony odsprężające.

Rys. 5 przedstawia schemat układu z mostkiem aktywnym, który w zestawie z popularnym 3½-cyfrowym miernikiem uniwersalnym tworzy komparator rezystancji. Cały układ zasilany jest z jednego źródła o napięciu +12 V, natomiast napięcie zasilające mostka jest stabilizowane i wynosi +5 V. Napięcie wyjściowe mostka jest wzmocnione czterokrotnie i przy zmianie równowagi mostka o 1% wskazanie miernika przyłączonego do wyjścia układu zmienia się o 100 mV. Wynika stąd, że po wybraniu zakresu miernika 2 V uzyskuje się rozdzielczość pomiarową 0,01%, a po przełączeniu na zakres 200 mV – 0,001%. Aby do tych liczb zbliżyła się także dokładność pomiaru, równowaga mostka musi być sprawdzana i dostatecznie stabilna, aby nie wymagała częstej korekcji. Poprawność wskazań miernika można skontrolować posługując się przełącznikami S1, S2, S3, jak to zostało opisane przy objaśnianiu rys. 2, i dokonując korekcji wskazań potencjometrami P1 i P2. Wejściowe napięcie niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego kilka miliwoltów powoduje zmianę równowagi rzędu dziesiątych części pro-

centu, więc zwykle konieczne staje się skorygowanie zgrubne rezystorów stosunkowych R1 i R2 przez dołączanie do nich równolegle odpowiednio dobranych rezystorów. Do wzmacniania napięcia wyjściowego mostka służy precyzyjny wzmacniacz operacyjny o stosunkowo bardzo małym wejściowym napięciu niezrównoważenia, a dzięki temu nie ma ono praktycznie wpływu na działanie układu. Możliwe jest zastąpienie obu wzmacniaczy układem w jednej obudowie (np. TL082), jednak wtedy trzeba liczyć się z dodatkowym zwiększeniem obszaru korekcji równowagi mostka i możliwością gorszej stabilności wskazań. Napięcie na mierzonym rezystorze wynosi ok. 2,5 V zatem przy jego rezystancji 25 Ω jest obciążany mocą 0,25 W. Chociaż badanie trwa krótko, to przy bardzo dokładnych pomiarach nagrzewanie rezystora może znacząco zmienić wyniki. Ponadto inne błędy spowodowane rezystancją styków ograniczają dolną granicę rezystancji. Kondensator C1 ma na celu usunięcie oscylacji pasożytniczych, jakie mogłyby pojawić się przy sprawdzaniu rezystorów drutowych.

Pokazany na rys. 6. układ pomiarowy jest w porównaniu z wyżej opisanym wg rys. 5 bardziej rozbudowany, ale też znacznie lepszy. Przede wszystkim umożliwia pomiary rezystorów w układzie czterostykowym, a dzięki zasilaniu aktywnego mostka zmiennym napięciem prostokątnym 100 Hz i zastosowaniu detekcji fazowej w torze wzmacniania, usuwany jest wpływ na wyniki pomiarów sygnałów stałoprądowych m.in. napięć niezrównoważenia wzmacniaczy operacyjnych. Dla uzyskania lepszej czytelności działania układu na schemacie klucze elektroniczne z układu CMOS 4053 narysowane są jako oddzielne przełączniki. Ponadto na rys. 6 brak jest układów związanych z kontrolą wskazań przeprowadzaną za pośrednictwem przełączników S1, S2 i S3 pokazanych na rys. 2 i 5 oraz diod zabezpieczających wejścia wzmacniaczy operacyjnych (por. rys. 5). Z przerzutnika U6B taktowanego sygnałem 200 Hz z układu 555 (U5) pracującego jako multiwibrator otrzymuje się prostokątne napięcie symetryczne 100 Hz służące do sterowania kluczy elektronicznych. Klucz 4053B łączy na przemian poprzez człon CR wejście generatora z punktami układu o napięciach różniących się o 5 V. Sterowany w ten sposób generator napięcia prostokątnego zestawiony jest ze wzmacniacza operacyjnego U1 i tranzystorów zwiększających jego moc wyjściową. Międzyszczytowa wartość napięcia wyjściowego generatora wynosi 5 V, a chwilowe napięcie wejściowe mostka aktywnego +2,5 V lub -2,5 V względem stabilizowanego napięcia stałego +6 V. W porównaniu z układem z rys. 5 napięcie na rezystorze R_x jest więc 2 razy mniejsze (= ok. 1,25 V), a moc tracona na rezystorze dla takiej samej rezystancji – 4 razy mniejsza. Jednak rezystory 6 Ω są już obciążane mocą ok. 0,25 W. Napięcie wyjściowe



Rys. 5. Układ do porównywania rezystancji ze stałoprądowym aktywnym mostkiem niezrównoważonym

mostka jest wzmacniane ośmiokrotnie, a następnie odwracane w fazie o 180° przez inwerter (U3A). Funkcję detektora fazowego spełnia klucz 4053A, który łączy na przemian, zgodnie z fazami zasilania mostka, wyjścia wzmacniacza U2B i inwertera U3A.

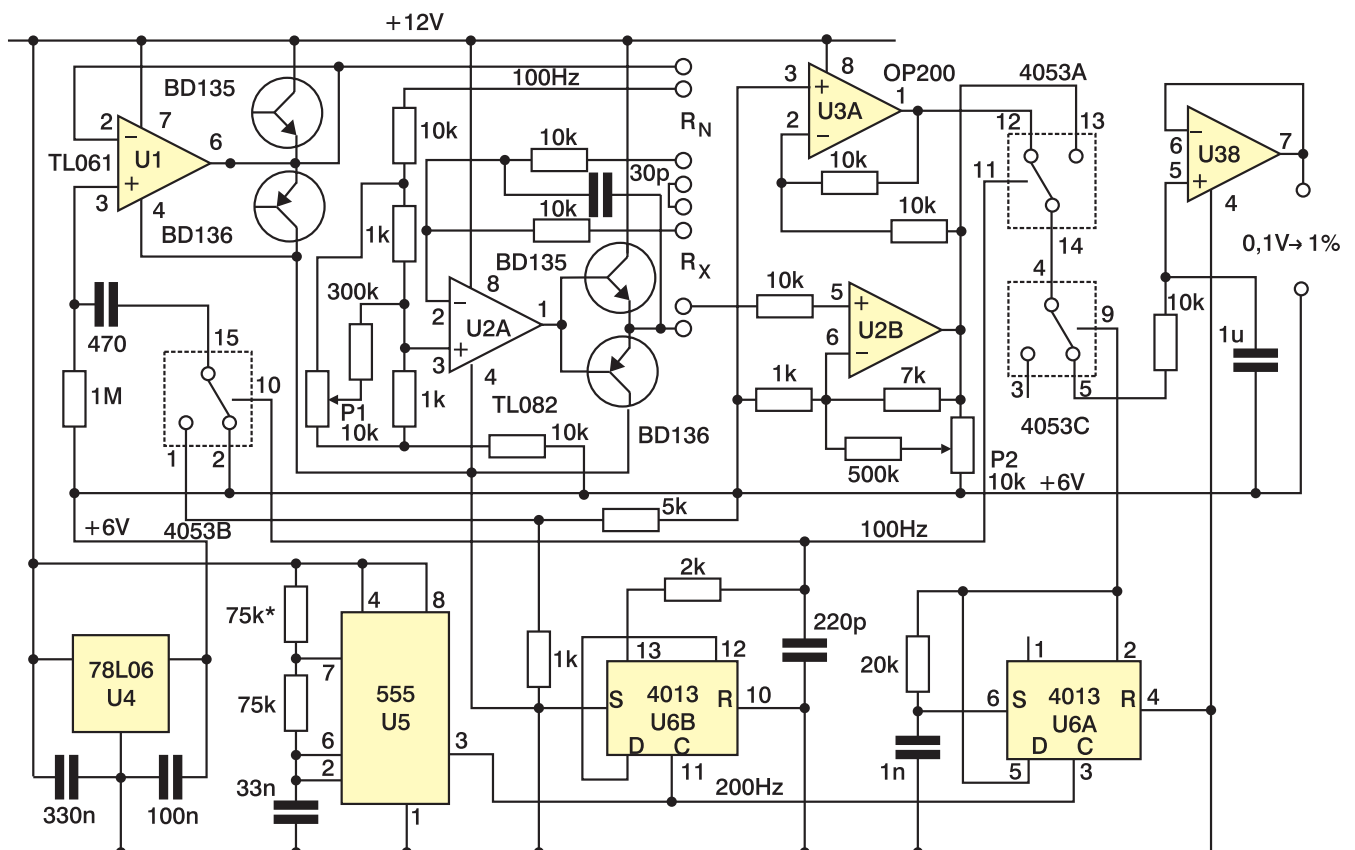
Każda zmiana polaryzacji mostka wiąże się z zakłóceniami w przenoszonym sygnale spowodowanymi nieidealnymi własnościami użytych wzmacniaczy operacyjnych. Celem uniknięcia błędów, które mogą te zakłócenia wywoływać, klucz 4053C odłącza chwilowo stopień wyjściowy U3B od kanału pomiarowego. Klucz ten sterowany jest impulsem o czasie trwania ok. $10 \mu\text{s}$ generowanym przez przerzutnik U6A w czasie zmiany znaku napięcia zasilającego mostek. Zastosowanie

napięcia prostokątnego do zasilania mostka ma zalety np. napięcie wyjściowe detektora fazowego jest niemal stałe, jeśli napięcia niezrównoważenia wzmacniaczy są nieznaczne (ewent. można je skompensować); nie ma więc problemów z jego wygładzaniem. Jednak taki kształt napięcia uniemożliwia wykorzystanie mostka do sprawdzania kondensatorów i dławików. Podobnie jak w układzie wg rys. 5 względna różnica rezystancji 1% powoduje zmianę napięcia wyjściowego o 100 mV, a uzyskiwana rozdzielczość pomiarowa na zakresie 200 mV $3\frac{1}{2}$ -cyfrowego miernika wynosi 0,001%. Jednak korzystanie z takiej wysokiej czułości układu pomiarowego może być celowe tylko wyjątkowo przy porównywaniu rezystorów

precyzyjnych o bardzo małym TWR. Jeśli TWR jest znaczny, to już dotknięcie rezystora spowoduje zauważalną zmianę jego rezystancji. Zwykle rozdzielczość 0,01%, którą uzyskuje się na zakresie 2 V (20%) miernika, jest całkowicie wystarczająca.

Komparatory rezystancji mogą zastąpić pięcio-, a nawet sześciocyfrowe omierniki na stanowisku sprawdzającym precyzyjne rezystory. Są od tych przyrządów nieporównywalnie tańsze i na ogół wydajniejsze. Wzorcem może być jeden ze sprawdzanych rezystorów uprzednio zmierzony aparaturą laboratoryjną. Zależnie od rezystancji takiego wzorca można ustalić graniczne wartości tolerancji uwzględniające także błędy pomiarowe. Dzięki układowi umożliwiającemu korekcję wskazań uzyskanie małego sumarycznego błędów np. mniejszego od 0,01% przy sprawdzaniu rezystorów 0,5% o rezystancjach od kilkudziesięciu omów do kilku megomów nie jest trudne nawet przy założeniu, że wynik pomiaru pokazuje $3\frac{1}{2}$ -cyfrowy miernik z błędem 1%. Dokładna rezystancja wzorca nie musi być znana, jeśli wybiera się pary rezystorów o możliwie jednakowych rezystancjach. Są one potrzebne w wielu układach np. w inwerterze U3A (rys. 6), a także w gałęziach stosunkowych opisywanych mostków. Proste przyrządy z mostkami niezrównoważonymi mogą nie tylko ułatwić dokładną selekcję sprawdzanych elementów, ale także są przydatne w pomiarach małych zmian badanych wielkości np. TWR lub pracując z różnego typu czujnikami.

Jan Szrednicki



Rys. 6. Układ do porównywania rezystancji ze zmiennoprądowym aktywnym mostkiem niezrównoważonym