ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1966
Seria: AUTOMATYKA z. 7 Nr kol. 167

JINDŘICH FOREJT
Elektrotechnická Fakulta
České Vysoké Uceni Technické v Praze
Poděbrady

(Tłumaczył S. Malzacher)

ZASTOSOWANIE POMIAROWYCH PRZETWORNIKÓW POJEMNOŚCIOWYCH DO POMIARU RÓŻNYCH WIELKOŚCI PRZY CZĘSTOTLIWOŚCI 50 Hz

Streszczenie. W artykule omówiono możliwości zastosowania pomiarowych przetworników pojemnościowych do pomiaru różnych wielkości przy zasilaniu ich częstotliwością sieciową oraz przedstawiono typowe człony składowe takich układów pomiarowych.

Podano przykłady zastosowań tego rodzaju przetworników w laboratoryjnych i przemysłowych miernikach do pomiaru różnych wielkości nieelektrycznych.

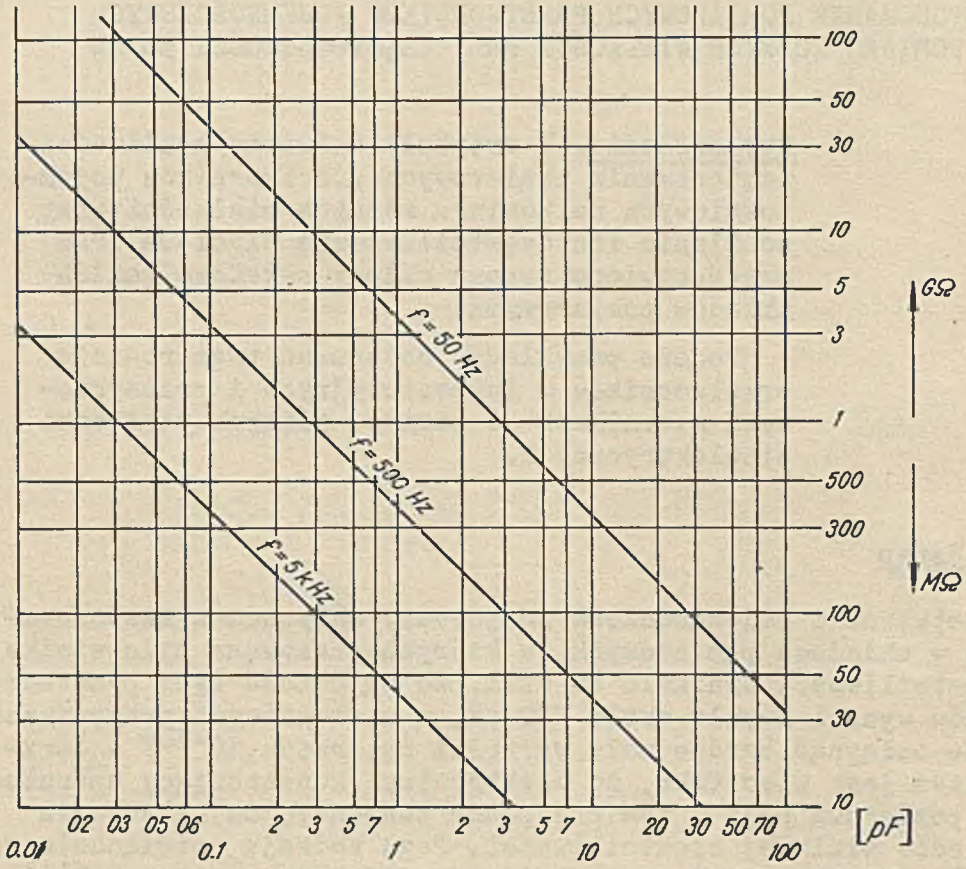
1. Wstęp

Przetworniki pojemnościowe znajdywały dotychczas zastosowanie w układach pomiarowych, w których stosowana była wielka częstotliwość. Wynikało to stąd, że pojemność tych przetworników wynosi zwykle około 100 pF, a w niektórych przypadkach może osiągnąć bardzo małe wartości np. rzędu 10^{-16}F - oczywistym jest więc fakt, że elektronicy, konstruujący aparaturę pomiarową mają w tym przypadku tendencję do stosowania układów wielkiej częstotliwości. Tego rodzaju rozwiązania są bardzo często zawodne, zwłaszcza ze względu na złą stałość pracy obwodów wielkiej częstotliwości. Dla wielu celów można jednak stosować przetworniki pojemnościowe zasilane częstotliwością sieciową (50 Hz), co znacznie upraszcza konstrukcję

aparatury pomiarowej i pozwala osiągnąć lepszą stabilność i pewność pracy urządzeń.

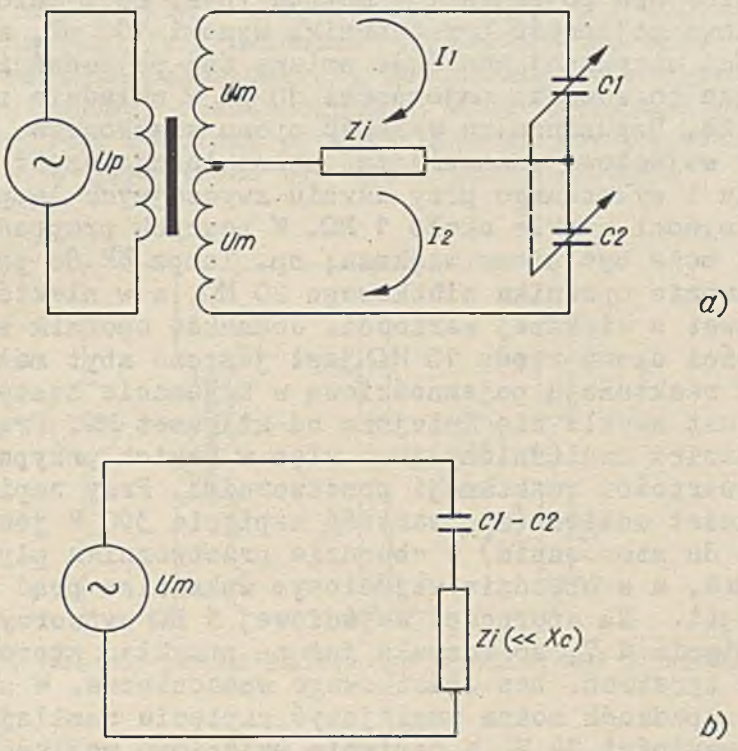
2. Podstawowe parametry układu

Reaktancja przetwornika pojemnościowego przy częstotliwości sieciowej jest - jak wiadomo - znaczna, nie jest to jednak przeszkodą w stosowaniu przetworników tego typu w układzie



Rys. 1. Zależność reaktancji pojemnościowej przetwornika pojemnościowego od jego pojemności przy trzech różnych częstotliwościach: 50 Hz (sieć energetyczna), 500 Hz (sieć samolotowa), 50 kHz (generator małej częstotliwości)

pomiarowym zasilanym częstotliwością 50 Hz. Jak widać z rys.1 kondensator o pojemności 100 pF ma przy częstotliwości sieciowej reaktancję wynoszącą około 32 MΩ, kondensator o pojemności 1 pF będzie mieć reaktancję rzędu 3 GΩ.



Rys. 2. Półpełny mostek z przetwornikami pojemnościowymi: a) układ mostka, b) schemat zastępczy, uproszczony mostka

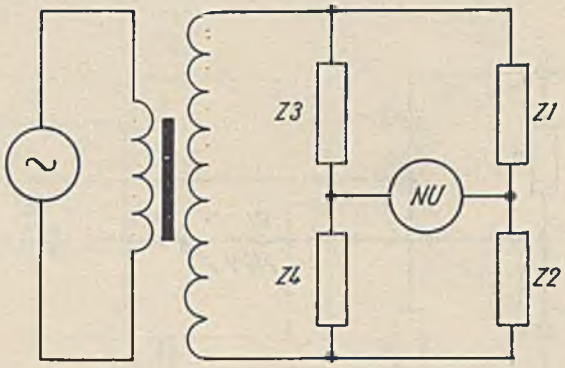
Na rys. 2a przedstawiono układ tzw. półpełnego mostka, zasilanego z sieci; podobny układ używany jest często w pomiarowych i regulacyjnych urządzeniach przemysłowych np. do pomiaru temperatury przy pomocy termometrów oporowych. Z_i reprezentuje tu impedancję wejściową wskaźnika, C_1 i C_2 pojemność przetwornika pojemnościowego i normali pojemnościowej względnie pojemność obu części różnicowego przetwornika z dodatkowymi równoległymi kondensatorami i ewentualnie po-

jemnością kabla, łączącego przetwornik z układem pomiarowym. Jeśli impedancja wejściowa wskaźnika jest znacznie, np. stukrotnie - mniejsza od reaktancji kondensatora (przetwornika) można wówczas omawiany mostek przedstawić w postaci uproszczonego układu zastępczego z jedną pojemnością, która stanowi różnicę obu pojemności w mostku (rys. 2b). Załóżmy, że początkowa pojemność przetwornika wynosi 100 pF, a zmiana wielkości mierzonej powoduje zmianę tej pojemności o 10%; odpowiada to wówczas pojemności 10 pF w układzie zastępczym z rys. 2b. Dopuszczalna wartość oporu siatkowego, a więc oporność wejściowa wzmacniacza, stanowiącego część wskaźnika w mostku i wykonanego przy użyciu zwyczajnych lamp elektronowych wynosi zwykle około 1 MΩ. W pewnych przypadkach wartość ta może być nieco większa; np. lampa EF 86 pozwala na zastosowanie opornika siatkowego 20 MΩ, a w niektórych układach nawet o większej wartości. Jednakże opornik siatkowy o wartości oporu rzędu 10 MΩ jest jeszcze zbyt mały w porównaniu z reaktancją pojemnościową w schemacie zastępczym, która jest zwykle nie mniejsza od kilkuset MΩ. Prąd wejściowy wskaźnika uzależniony jest więc w takich przypadkach głównie od wartości reaktancji przetwornika. Przy napięciu rzędu kilkuset woltów (np. wartość napięcia 300 V jest jeszcze możliwa do stosowania) w obwodzie przetwornika płynie prąd np. 10 μA, a w obwodzie wejściowym wskaźnika prąd różnicowy rzędu 1 μA. Na oporności wejściowej 1 MΩ wytworzy on spadek napięcia 1 V, co pozwala już na przykład sterować bezpośrednio tyratron, bez dodatkowego wzmacniacza. W szczególnych przypadkach można zmniejszyć napięcie zasilające mostek, np. do wartości 24 V, a napięcie wyjściowe mostka będzie jeszcze rzędu setek mV.

Przy zastosowaniu układów tranzystorowych jako układów wejściowych wskaźnika opłaca się również zbudować przy użyciu tranzystorów generator zasilający mostek, przy czym można wówczas stosować również wyższą częstotliwość, stale jednak układ mostka pozostaje w stanie bliższym zwarciu niż biegu luzem. Ze względu na to, że w artykule niniejszym zajmujemy się przyrządami sieciowymi, rozważania nasze warto ograniczyć jednak tylko do układów lampowych.

3. Mostek pojemnościowy

Mostek, który jest stosowany w pojemnościowych układach pomiarowych jest rzadko oryginalnym układem z czterema wyraźnymi ramionami, jak na rys. 3. Podstawową zaletą takiego układu jest niezależność gałęzi pomiarowych i równoważących mostka; wadą jego jest natomiast obciążenie wnoszone przezeń do generatora zwłaszcza gdy nie stosuje się dodatkowych pomocniczych gałęzi reaktancyjnych. Przy zasilaniu mostka z sieci obciążenie wnoszone przezeń niczemu nie przeszkadza i właściwie w praktyce może być dobierane dowolnie.

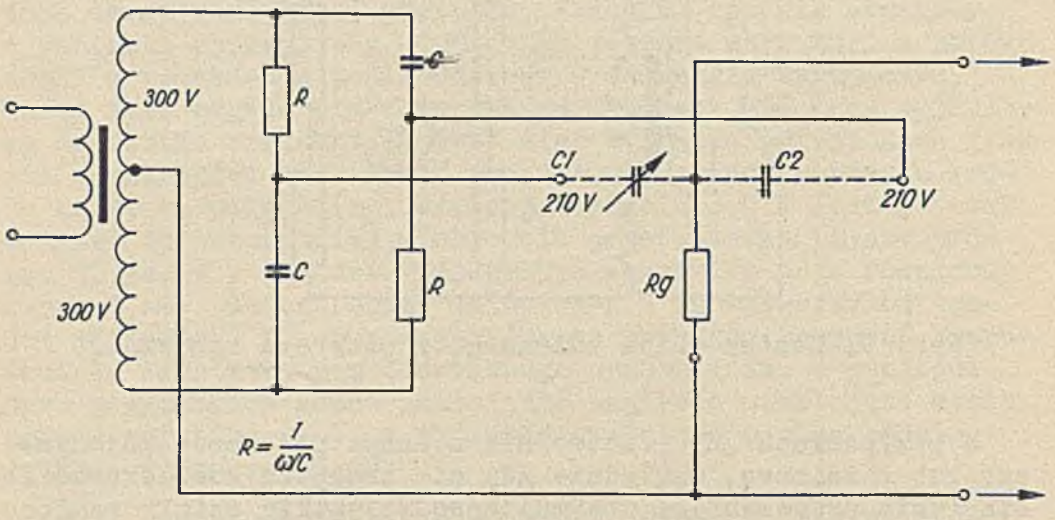


Rys. 3. Mostek prądu zmiennego z czterema ramionami

W przypadkach gdy przetwornik stanowi pojemność pojedynczą lub różnicową, względnie gdy nie zachodzi konieczność zestawiania przetwornika obejmującego wszystkie cztery ramiona mostka, wygodniejszy jest układ tzw. mostka półpełnego (rys. 2a), który składa się tylko z dwóch reaktancji w gałęzi roboczej, posiadających wspólny punkt łączący się z jednym z zacisków wskaźnika, podczas gdy drugi zacisk wskaźnika jest przyłączony do środkowego zaczepu uzwojenia transformatora zasilającego mostek.

Ważną okoliczność, która musi być brana pod uwagę stanowią fazy początkowe sygnału w różnych punktach układu pomiarowego. Punktem wyjściowym rozważań może być faza napięcia na wtórnym uzwojeniu transformatora zasilającego mostek. Ze względu na to, że mostek pracuje w stanie bliskim zwarcia jego zacisków wyjściowych, a przetworniki mają charakter po-

jemnościowy, prąd w przekątni wskaźnika, a więc także napięcie wyjściowe mostka są przesunięte o 90° względem napięcia zasilającego. Detektor fazowy (przed wzmacniaczem) wymaga jednak sygnału zgodnego w fazie z napięciem zasilającym. Najdogodniejszym sposobem - z kilku możliwych - umożliwiającym uzyskanie takiego stanu jest wprowadzenie dwóch dodatkowych członów RC w obwód wtórnego uzwojenia transformatora zasilającego mostek, jak na rys. 4. Pozwala to jednocześnie na częściowe odfiltrowanie wtórnego napięcia transformatora od wyższych harmonicznych. Pewną niepożądaną własnością członu RC jest to, że kąt fazowy wytwarzany przez ten człon jest uzależniony od częstotliwości, np. przy zmianie częstotliwości o 2% to jest o 1 Hz, reaguje on zmianą fazy o 25'.

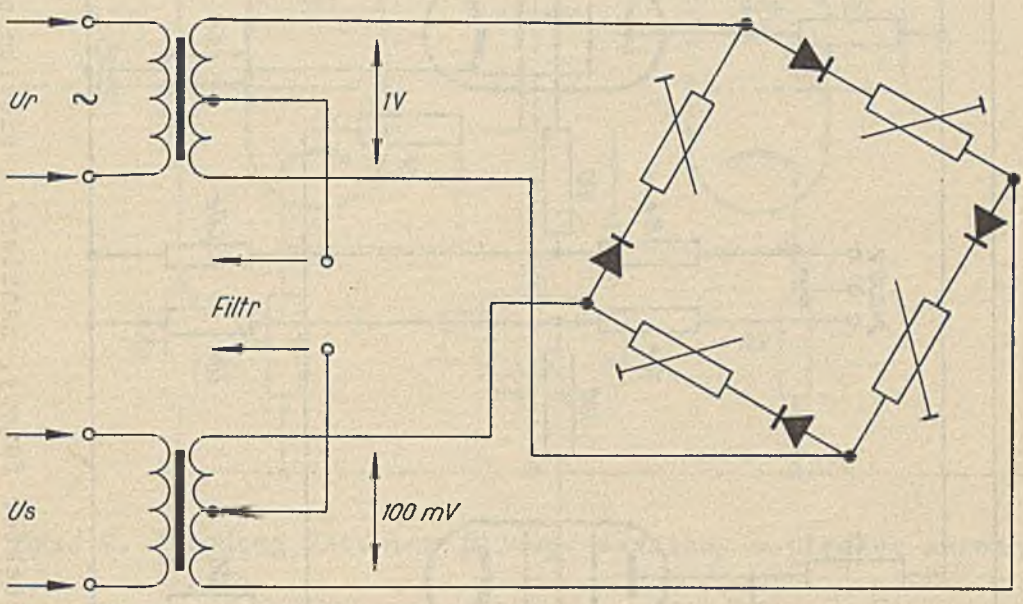


Rys. 4. Człony korygujące fazę po stronie napięcia zasilającego

W niektórych przypadkach wygodniej jest zmieniać w sposób ciągły fazę napięcia wiodącego, ponieważ mierzona wielkość nieelektryczna może wpływać nie tylko na składową urojoną (reaktancję pojemnościową), lecz również na składową czynną np. przy pomiarze wilgotności niektórych materiałów. Fazę napięcia wiodącego nastawia się więc w takich przypadkach doświadczalnie tak, aby czułość układu była największa.

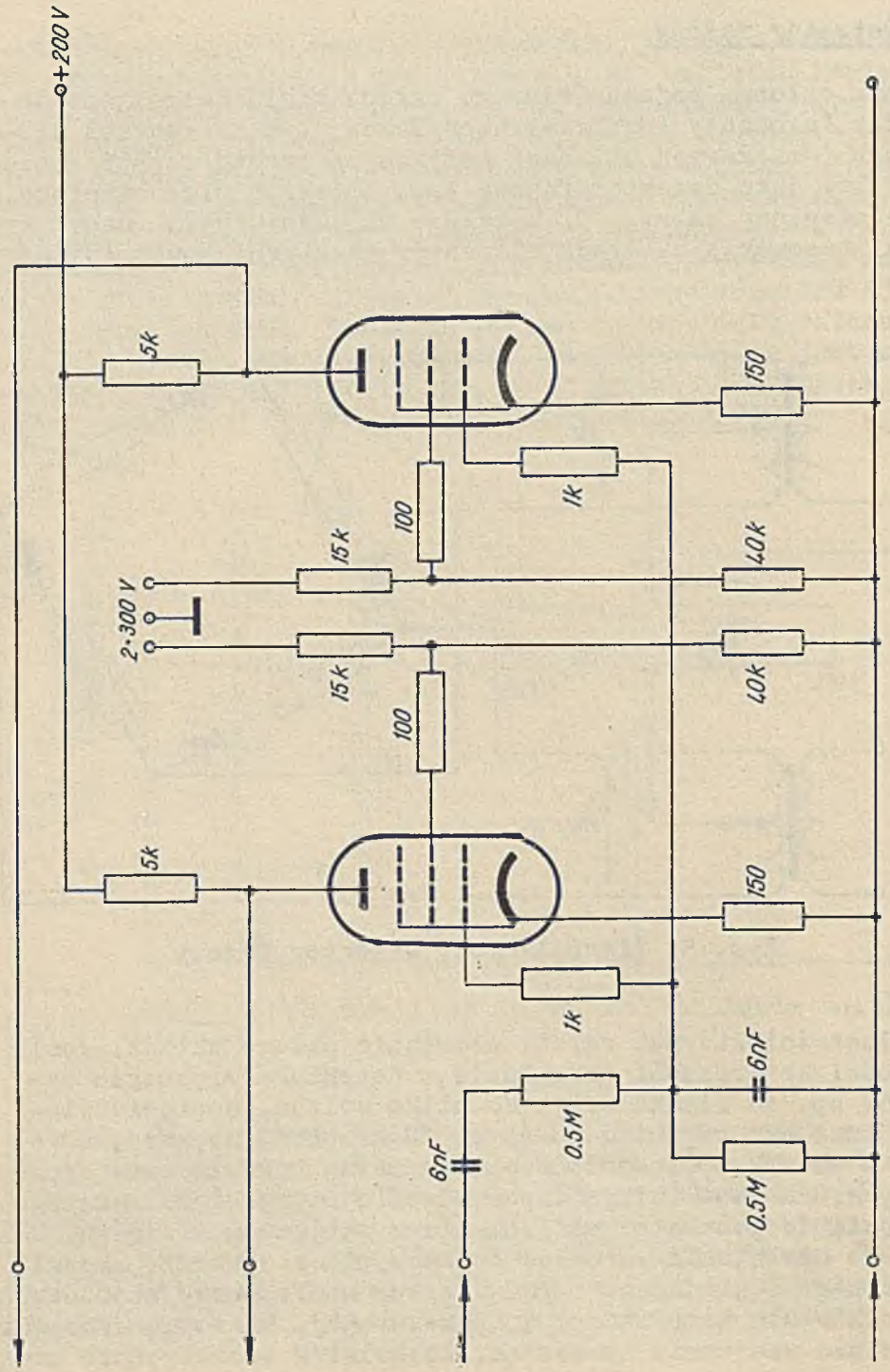
4. Detektor fazowy

Ważnym członem pojemnościowego układu pomiarowego jest detektor fazoczuły (dyskryminator fazowy). W dotychczas używanych pomiarowych układach mostkowych bardzo często stosowany był jako detektor fazowy tzw. detektor pierścieniowy, przedstawiony na rys. 5. Wykazuje on jednak pewne wady, wymaga stosowania czterech elementów elektronicznych (diod),



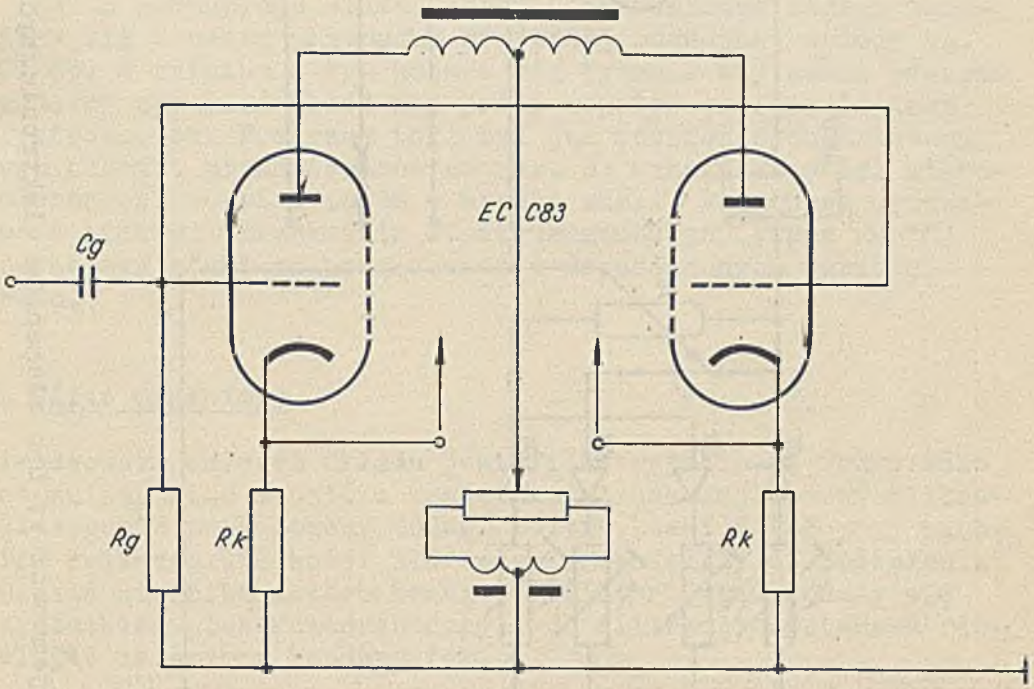
Rys. 5. Pierścieniowy detektor fazowy

od własności których zależy działanie całego układu. Jeśli zachodzi konieczność otrzymania z detektora większych sygnałów np. od ułamka wolta do kilku woltów, napięcie wiodące musi być odpowiednio (3 do 10-krotnie) większe, a wówczas w szereg z diodami detektora muszą być włączone oporniki, które umożliwiają doprowadzenie odpowiednio wyższego napięcia do przekątni odniesienia z napięciem wiodącym. Dążność do spełnienia warunków dopasowania w obwodzie sygnału mierzonego i wiodącego i jednoczesna konieczność stosowania oporników dla kompensacji temperaturowej, stanowią wymagania częściowo wzajemnie sprzeczne. Aczkolwiek teoretycznie mogą



Rys. 6. Pentodowy detektor fazowy, zasilany napięciem stałym

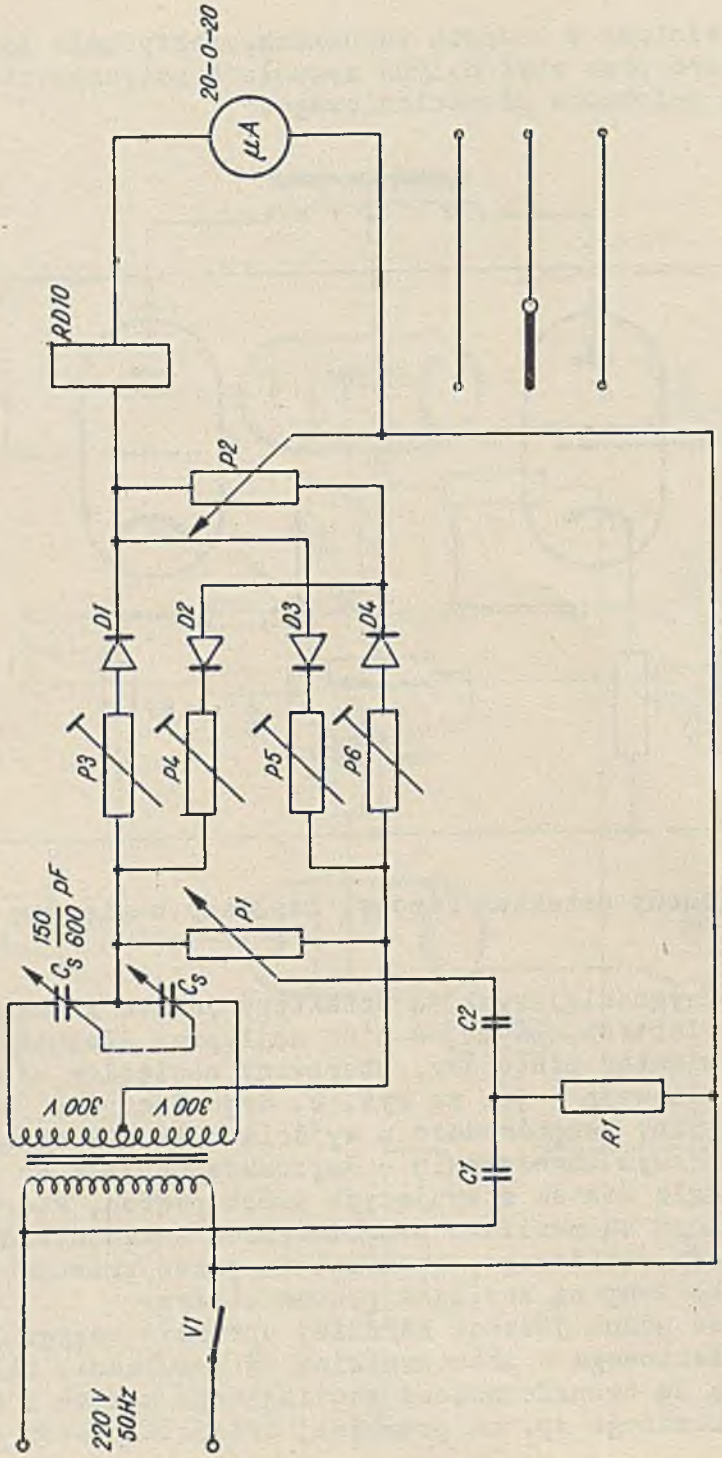
one być spełnione w każdych warunkach, praktycznie są osiągalne dopiero przy zbyt dużych sygnałach potrzebnych do wysterowania detektora pierścieniowego.



Rys. 7. Triodowy detektor fazowy, zasilany napięciem zmiennym

Znacznie wygodniejszymi są detektory fazowe z czynnymi elementami elektronicznymi, z nich najlepsze własności wykazuje dyskryminator pentodowy, sterowany napięciem wiodącym na siatkach ekranowych - jak na rys. 6. Sygnał czynny, pomiarowy - otrzymywany bezpośrednio z wyjścia układu mostkowego lub po dodatkowym wzmocnieniu - doprowadzony jest do połączonych równolegle siatek sterujących dwóch pentod, których siatki ekranowe są zasilane przeciwfazowo z niezależnego transformatora sieciowego, ewentualnie przez przesuwnik fazowy. Anody obu lamp są zasilane prądem stałym.

Cały układ można jeszcze bardziej uprościć rezygnując z zasilacza sieciowego z prostownikiem. W rezultacie układ ogranicza się do transformatora zasilającego mostek i dyskryminatora wykonanego np. na podwójnej triodzie; anody obu



Rys. 8. Sieciowy mostek pojemnościowy bez elementów elektronicznych

triod są przy tym zasilane zmiennym napięciem wiodącym, a sygnał wyjściowy doprowadzany do filtru i wskaźnika jest pobierany między katodami (rys. 7).

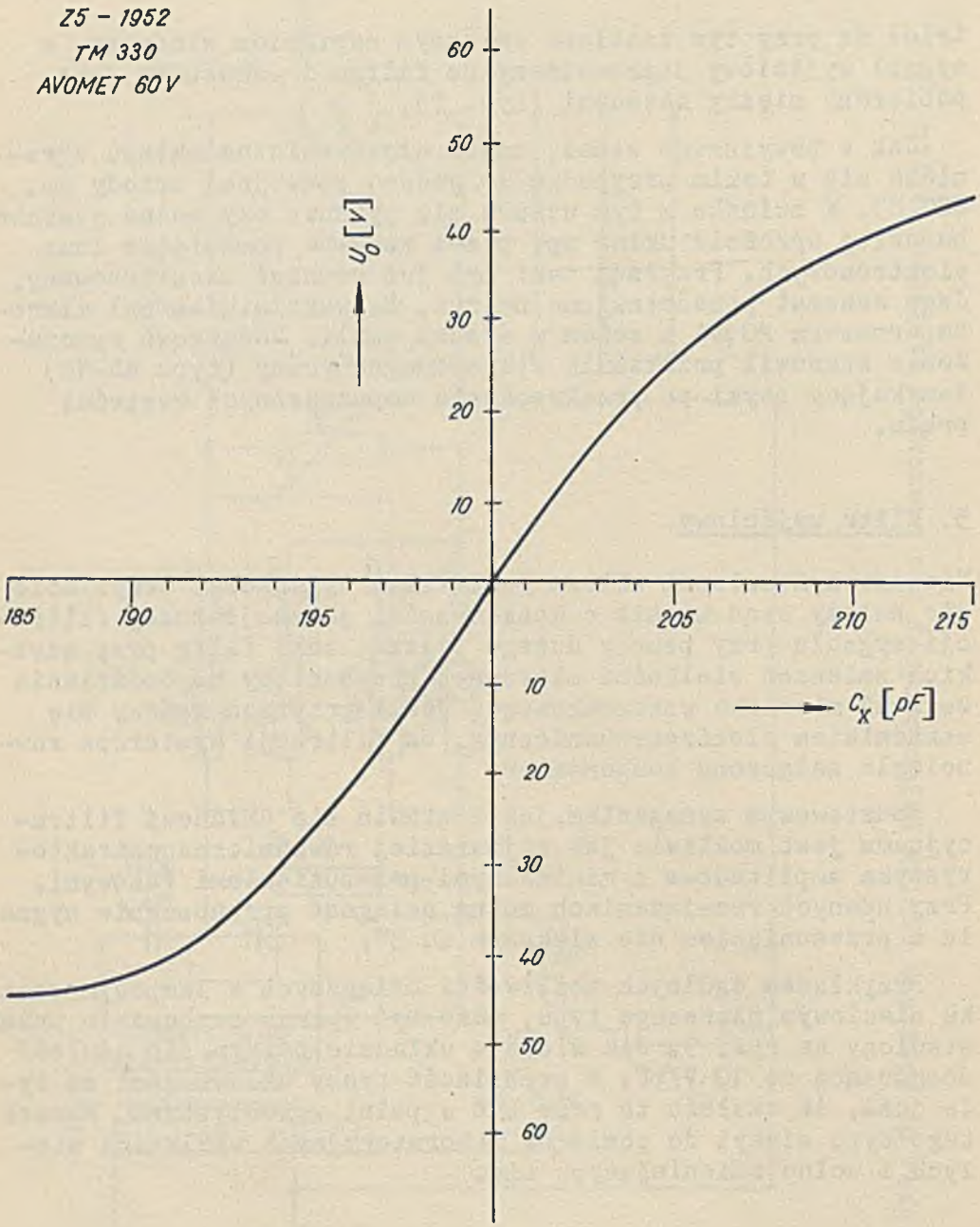
Jak z powyższego widać, część elektroniczna układu ogranicza się w takim przypadku do jednej podwójnej triody np. ECC 83. W związku z tym nasuwa się pytanie czy można jeszcze bardziej uprościć układ np. przez zupełne pominięcie lamp elektronowych. Przyrząd taki był już również skonstruowany. Jego schemat przedstawiono na rys. 8; wskaźnikiem był mikroamperomierz 20 μA z zerem w środku skali. Dodatkowe wyposażenie stanowił przekaźnik elektromagnetyczny (typu RD-10) zamykający styki po przekroczeniu dopuszczonych wartości prądu.

5. Filtr wyjściowy

Nieodzownym członem układu jest filtr wyjściowy. Oczywiście nie należy stąd wnosić o konieczności jak najlepszej filtracji sygnału przy pomocy dużego filtru, taki filtr przy szybkich zmianach wielkości mierzonej prowadziłby do opóźniania wskazań miernika wskazówkowego. Jeśli przyrząd kończy się wskaźnikiem elektromechanicznym, do filtracji wystarcza równolegle załączony kondensator.

Podstawowym wymaganiem, jakie stawia się układowi filtracyjnemu jest możliwie jak najbardziej równomierna charakterystyka amplitudowa z minimalnymi przesunięciami fazowymi. Przy udanych rozwiązaniach można osiągnąć przenoszenie sygnału z przesunięciem nie większym od 5°.

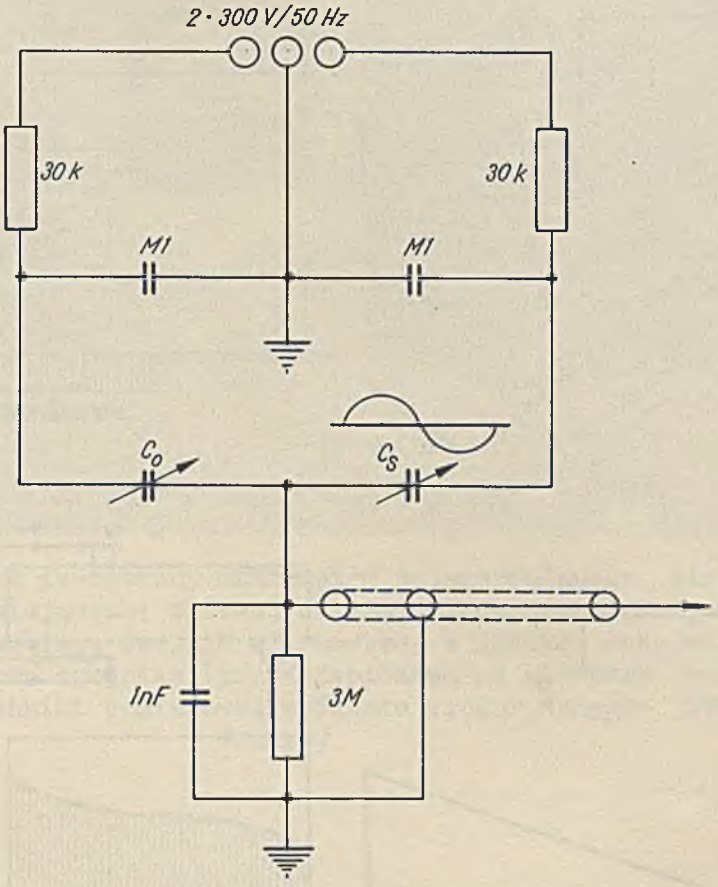
Przykładem ogólnych możliwości osiąganych w lampowym mostku sieciowym starszego typu, może być wykres cechowania przedstawiony na rys. 9. Jak widać w układzie osiąga się czułość dochodzącą do 10 V/pF, a stabilność pracy układu jest na tyle duża, że czułość ta może być w pełni wykorzystana. Mostek tego typu służył do pomiarów laboratoryjnych wielkości stałych i wolno zmieniających się.



Rys. 9. Krzywa cechowania mostka sieciowego z trzema lampami elektronowymi

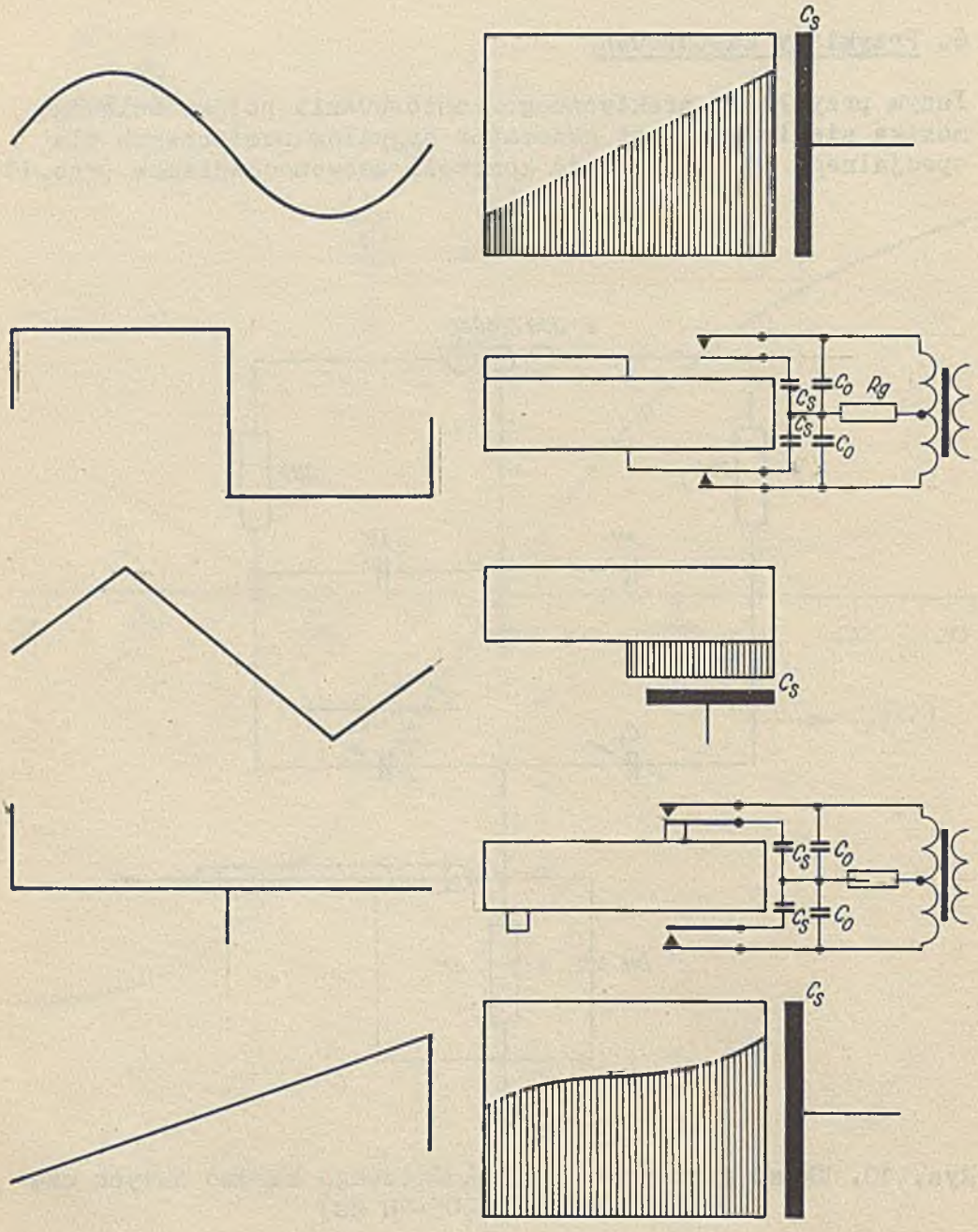
6. Przykłady zastosowań

Innym przykładem praktycznego zastosowania pojemnościowego mostka sieciowego jest generator sygnałów pomiarowych dla specjalnego oscylografu do kontroli serwomechanizmów (rys.10)

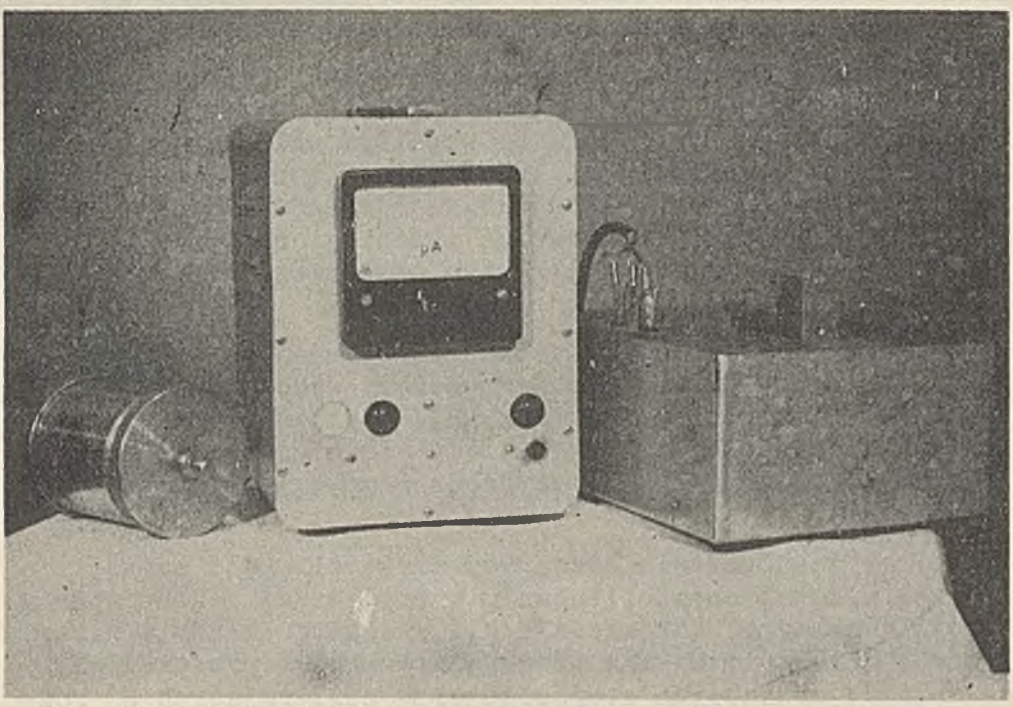


Rys. 10. Układ generatora pojemnościowego bardzo małych częstotliwości (0,05-10 Hz)

Jednym z kondensatorów w mostku jest kondensator cylindryczny ze zmienną szerokością którjekolwiek z elektrod, dzięki czemu uzyskuje się harmonicznie zmieniającą się pojemność.



Rys. 11. Przebiegi sygnałów otrzymywanych z generatora pojemnościowego i urządzenia do ich realizacji



Rys. 12. Widok zewnętrzny mikrometru pojemnościowego bez elementów wzmacniających: z lewej przetwornik pojemnościowy w obudowie, stanowiący czujnik mikrometru, w środku wskaźnik, z prawej podstawa czujnika (praca dyplomowa na kierunku automatyzacji i techniki pomiarowej wydziału elektrycznego ČVUT w Pradze)

Kondensator ten jest napędzany silnikiem o zmienianej liczbie obrotów tak, że częstotliwość modulacji może być zmieniana od najbardziej niskiej (przy 3 obrotach na minutę) do najwyższej, wynoszącej 10 Hz. Sygnał wyjściowy po wzmocnieniu i demodulacji stanowi napięcie harmoniczne, które doprowadza się na wejście badanego serwomechanizmu.

Zaletą rozwiązania mechanicznego jest to, że urządzenie pozwala na wytwarzanie najróżnorodniejszych sygnałów synchronicznych i synfazowych. Na wspólnym wale mieszczą się cylindryczne kondensatory, styki zwierające i inne elementy, dzięki czemu na wyjściu układu oprócz napięcia sinusoidalnego możemy otrzymać również przebiegi napięcia prostokątnego, trójkątnego, szpilkowego, piłozębowego itp., jak na rys. 11.

Dalszym przykładem zastosowań opisywanej techniki pomiarowej może być mikrometr pojemnościowy wykonany bez użycia elementów elektronicznych (rys. 8). Czułość progowa przekaźnika na wyjściu tego układu odpowiada zmianie pojemności 2-5 pF. Widok zewnętrzny przyrządu tego typu przedstawia rys. 12.

Dzięki zastosowaniu sieciowej częstotliwości nośnej w miejsce wyższej częstotliwości, otrzymywanej z generatorów specjalnego typu, upraszczają się znacznie układy i wzrasta pewność działania mostka pojemnościowego. W przeciwieństwie do układów mostkowych starszego typu zawierających 80 różnych elementów składowych, mostek sieciowy o tych samych właściwościach zawiera tylko 36 elementów i trzykrotnie większą niezawodność. Jest rzeczą oczywistą, że dla przypadków, w których wymagana jest bardzo duża dokładność pomiaru nie wystarcza prosty sposób zasilania mostka bezpośrednio, niestabilizowanym napięciem sieciowym, a konieczne jest ustalenie chociażby amplitudy napięcia zasilającego; stałość częstotliwości jest na ogół wystarczająca dla wszystkich przypadków spotykanych w praktyce.

Dla stabilizacji amplitudy napięcia zasilającego najbardziej celowym wydaje się zastosowanie oporników nieliniowych (warystorów) z małą stałą czasową, a więc na prąd 50 lub 60, w skrajnym przypadku 100 mA. Warystor taki włącza się między sieć i odgałęzienie w uzwojeniu pierwotnym transformatora. Jego niewielka sprawność (50-70%) nie jest przeszkodą w stosowaniu go w przyrządach pomiarowych.

Z powyższego krótkiego przeglądu zagadnień widzimy, że stosowanie napięcia o częstotliwości sieciowej do zasilania układów z przetwornikami pojemnościowymi pozwala często osiągnąć, zwłaszcza w urządzeniach przemysłowych, dużą prostotę i stałość pracy układu pomiarowego.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 10.XI.1965 r.

LITERATURA

[1] Forejt J.: Kapacitni měřiče nieelektrických veličin. SNTL Praha 1963.

ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ, ПИТАЕМЫЕ ЧАСТОТОЙ 50 ГЦ. И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Р е з ю м е

В статье разобрано возможности применения емкостных датчиков, питаемых частоты 50 гц, для измерения различных физических величин, а также представлено типические составляющие звена такого измерительного устройства. Представлено тоже несколько примеров применения емкостных датчиков в лабораторных и промышленных измерениях неелектрических величин.

CAPACITIVE TRANSDUCERS AND THEIR APPLICATION IN MEASUREMENT OF VARIOUS PHYSICAL QUANTITIES AT FREQUENCY 50 CYCLES PER SECOND

S u m m a r y

The paper presents some application possibilities of capacitive transducers in measurement of various quantities at frequency 50 cycles per second and typical members of such measurement circuits. Some examples of applications described capacitive transducers in the laboratory and research are given.