



(12) Ausschließungspatent

(11) DD 285 698 A7

Erteilt gemäß § 18 Absatz 2
Patentgesetz der DDR
vom 27.10.1983
in Übereinstimmung mit den entsprechenden
Festlegungen im Einigungsvertrag

4(51) G 01 R 27/26

DEUTSCHES PATENTAMT

(21) DD G 01 R / 313 280 8

(22) 01.03.88

(45) 03.01.91

(71) Ministerrat der DDR, Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung, Fürstenwalder Damm 388, Berlin, 1162, DD

(72) Hornemann, Dieter, Dipl.-Ing.; Wilhelm, Dieter, DD

(73) Ministerrat der DDR, Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung, Berlin, 1162, DD

(74) siehe (71)

(54) Schaltung zur Realisierung veränderbarer Verlustfaktormaßverkörperungen

(55) Kondensator; Kapazität; Verlustfaktor; veränderbare Verlustfaktormaßverkörperung; Parallelverluste; Reihenverluste; passive Schaltung, T-Schaltung, π -Schaltung; Transformation; Kompensation

(57) Die Erfindung betrifft eine Schaltung zur Realisierung veränderbarer Verlustfaktormaßverkörperungen.

Ausgehend von den verschiedenen Ursachen des Verlustfaktors von Kondensatoren, von den mit handelsüblichen Folien- und Keramik Kondensatoren sowie mit luft- oder schutzgasgefüllten Kondensatoren erreichbaren

Verlustfaktoren und von den Nachteilen bei der Verwendung dieser Kondensatoren als

Verlustfaktormaßverkörperungen wird eine passive Schaltung für veränderbare Verlustfaktormaßverkörperungen angegeben und in zwei Schaltungsvarianten beschrieben. Das Ziel der Erfindung ist es veränderbare

Verlustfaktormaßverkörperungen zu schaffen, welche sich dadurch auszeichnen, daß mit handelsüblichen

Kondensatoren sowohl große als auch sehr kleine Verlustfaktorwerte dargestellt werden können. Hierbei ist auch die Darstellung kleinerer Verlustfaktoren als die Eigenverlustfaktorwerte der verwendeten Kondensatoren zu realisieren.

Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, daß zwei handelsübliche Kondensatoren durch einen veränderbaren Widerstand zu einer T-Schaltung ergänzt werden, daß durch Abgleich dieses Widerstandes der relativ große und die Realisierung kleiner Verlustfaktorwerte verhindernde Eigenverlustfaktor der Kondensatoren auf einen sehr kleinen, für die

Darstellung größerer Verlustfaktorwerte vernachlässigbaren Wert kompensiert wird, daß zur Realisierung größerer Verlustfaktorwerte der Wert eines konstanten Widerstandes über einen Transformator, der in Reihe oder parallel zur genannten T-Schaltung geschaltet ist, herunter oder hoch transformiert wird und daß durch Verändern des Übersetzungsverhältnisses des Transformators die gewünschten Verlustfaktorwerte eingestellt werden können. Für die Berechnung des Verlustfaktors, bzw. für die Dimensionierung der Schaltung, ist die zahlenmäßige Kenntnis der Eigenverlustfaktoren der Kondensatoren nicht erforderlich.

Patentanspruch:

Schaltung zur Realisierung veränderbarer Verlustfaktormaßverkörperungen, bestehend aus zwei in Reihe geschalteten verlustbehafteten Kondensatoren, einem Transformator mit veränderbarem Übersetzungsverhältnis sowie ohmschen Widerständen, **gekennzeichnet dadurch,**

- daß die zwei in Reihe geschalteten Kondensatoren, die den Kapazitätsnennwert (C) und den Verlustfaktorwert ($\tan\delta$) aufweisen, mit einem veränderbaren Widerstand (R_1) zu einer T-Schaltung zusammengeschaltet sind, wobei die Verlustfaktorwerte ($\tan\delta$) der beiden Kondensatoren (C) durch den veränderbaren Widerstand (R_1) auf annähernd Null kompensiert vorliegen und
- daß in an sich bekannter Weise der Wert eines konstanten Widerstandes R_2 über den Transformator, der in Reihe oder parallel zur genannten T-Schaltung geschaltet ist, entsprechend des einzustellenden Wertes der Verlustfaktormaßverkörperung herunter bzw. hoch transformiert wird.

Hierzu 2 Seiten Zeichnungen

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft eine passive Schaltung zur Realisierung veränderbarer Verlustfaktormaßverkörperungen, welche sich dadurch auszeichnet, daß sowohl sehr geringe als auch große Verlustfaktorwerte in einer Schaltung mit handelsüblichen Kondensatoren dargestellt werden können. Ihre Anwendung erfolgt auf dem Gebiet der elektrischen Meßtechnik zur Darstellung und Bewahrung des Verlustfaktors sowie zur Überprüfung von Verlustfaktormessmitteln für die Produktion dielektrischer Materialien und Isolierstoffe, bei der Herstellung von Kondensatoren sowie in der Kabelindustrie.

Charakteristik des bekannten Standes der Technik

Die Verluste von Kondensatoren setzen sich stets aus zwei Komponenten, den Parallel- und den Reihenverlusten zusammen. Verursacht werden die Reihenverluste durch den ohmschen Widerstand der Zuleitungen zu den Elektroden, den ohmschen Widerständen in den Elektroden selbst und durch Wirbelströme in den Zuleitungen und Elektroden. Der Einfluß von Isolationswiderständen und dielektrischer Absorption wird in den Parallelverlusten zusammengefaßt. Im Ersatzschaltbild werden die Parallelverluste als Wirkwiderstand R parallel zur Kapazität C und die Reihenverluste als Widerstand r in Reihe zu dieser Parallelschaltung dargestellt. Für den Gesamtverlustfaktor gilt somit die Beziehung

$$\tan\delta = \tan\delta_R + \tan\delta_r \quad (1)$$

mit

$$\tan\delta_R = \frac{1}{\omega C R} \quad (2)$$

und

$$\tan\delta_r = \omega C r. \quad (3)$$

Für feste Frequenzen kann jeweils einer der beiden Widerstände (Parallel- oder Reihenwiderstand) in einen äquivalenten Widerstand (Reihen- oder Parallelwiderstand) umgerechnet werden. Je nach Zweckmäßigkeit können daher die gesamten Verluste eines Kondensators entweder durch einen Reihenwiderstand oder einen Parallelwiderstand charakterisiert werden. Auf Grund der eingangs dargestellten verschiedenen Ursachen des Verlustfaktors von Kondensatoren und der damit verbundenen Abhängigkeit vom Material des Dielektrikums und der Elektroden, werden bei handelsüblichen Folien- und Keramik Kondensatoren je nach Kapazität und Frequenz Verlustfaktorwerte im Bereich von 10^{-3} bis 10^{-4} erreicht. Nur in Ausnahmefällen sind mit diesen Kondensatoren Verlustfaktorwerte von einigen 10^{-5} realisierbar. Verlustfaktoren $< 10^{-5}$ können dagegen nur mit luft- bzw. schutzgasgefüllten Kondensatoren, die auf Grund ihrer niedrigen relativen Dielektrizitätskonstante ein recht großes Volumen besitzen, erreicht werden.

Werden handelsübliche Folien- oder Normalluftkondensatoren als Verlustfaktormaßverkörperungen verwendet, so liefern sie bei vorgegebener Frequenz nur einen einzigen Verlustfaktorwert. Zur Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten ist es üblich, durch Parallel- oder Serienschaltung konstanter Widerstände zum Kondensator, bei einem Kapazitätsnennwert mehrere Verlustfaktorfixpunkte zu realisieren. Hierbei ist entsprechend den Beziehungen (2) oder (3) für jede Betriebsfrequenz und jeden Verlustfaktornennwert ein Widerstandswert erforderlich. Dies führt bei der Realisierung verschiedener Verlustfaktorwerte, gegebenenfalls bei mehreren Meßfrequenzen, sehr schnell zu einer Vielzahl von Widerständen, die, zum Erreichen vorgegebener Verlustfaktorwerte, einzeln abgeglichen werden müssen. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Eigenverlustfaktorwerte der verwendeten Kondensatoren in den Widerstandsabgleich mit eingehen und daß ein Unterschreiten dieser Eigenverlustfaktorwerte nicht möglich ist. Zur Realisierung geringer Verlustfaktorwerte werden deshalb stets luft- oder gasgefüllte Kondensatoren benötigt. Die Herstellung von veränderbaren Verlustfaktormaßverkörperungen nach dem derzeitigen Stand der Technik ist besonders dann, wenn ein breiter Verlustfaktorbereich realisiert werden soll, sehr arbeitsaufwendig. Bisher sind nur Einzelexemplare derartiger Verlustfaktormaßverkörperungen im Labor hergestellt worden. Eine industrielle Fertigung wurde höchstens ausnahmsweise und in sehr geringen Stückzahlen durchgeführt.

Neben den schon genannten Möglichkeiten zur Realisierung von Verlustfaktormaßverkörperungen ist aus der Hochspannungstechnik die Reihenschaltung von zwei Kondensatoren zu einem Verlustfaktornormal bekannt (Barz, J.-U.: Mittels Niederspannung einmeßbares Verlustfaktornormal für hohe Spannungen. Wirtschaftspatent, DD PS 217038, GO1R 27/26). Durch eine geeignete kapazitive Unterteilung wird bei dieser Schaltung erreicht, daß das betriebsmäßig bei Hochspannung benutzte Normal bei Niederspannung mit weniger aufwendigen Meßverfahren eingemessen werden kann. Der Verlustfaktor dieses Normals wird durch den Aufbau der Schaltung und durch die Parameter der Kondensatoren bestimmt. Eine Unterschreitung des damit festgelegten Verlustfaktorwertes ist nicht möglich. Die Darstellung geringer Verlustfaktorwerte kann deshalb auch hier nur durch die Verwendung von luft- oder gasgefüllten Kondensatoren erreicht werden, die, wie schon dargestellt, stets ein recht großes Volumen besitzen. Eine Realisierung verschiedener Verlustfaktorwerte ist mit der angegebenen Schaltung nicht vorgesehen. Dies ist nur möglich, wenn die Schaltung nach dem bekannten Stand der Technik mit den schon erläuterten arbeitsaufwendigen Nachteilen durch Parallel- oder Serienschaltung von Widerständen zu den Kondensatoren erweitert wird.

Nach dem gegenwärtigen Stand der Technik werden zur exakten Messung der Kapazität und des Verlustfaktors von Kondensatoren überwiegend Brückenschaltungen, die in den verschiedensten Schaltungsvarianten, wie z.B. die Meßbrücke nach Schering, die Giebe-Zickner-Brücke (Bleichschmidt, E.: Präzisionsmessungen von Induktivitäten und Zeitkonstanten. VEB Verlag Technik Berlin, Band 1 1955, S. 81-97) sowie Schaltungen die aus anderen Patentschriften, wie „Anordnung und Messung der Kapazität und der dielektrischen Verluste von geerdeten Prüflingen, insbesondere bei Hochspannung“ (Wirtschaftspatent, DD PS 757 167, GO1R 27/26) und „Schaltungsanordnung zur Verlustfaktormessung von Kondensatoren“ (Wirtschaftspatent, DD PS 233765, GO1R 27/26), bekannt sind, verwendet. Der Abgleich dieser Meßbrücken erfolgt nach dem Nullabgleichverfahren bzw. nach dem Kompensationsprinzip. Beim Einsatz hochempfindlicher Nullindikatoren, die nach dem gegenwärtigen Stand der Technik schon industriell hergestellt werden, wird die Auflösung und die Meßunsicherheit dieser Meßbrücken überwiegend durch die Abgleichmöglichkeit und die Stabilität der Bauelemente der Meßbrücken bestimmt.

Die Einführung von induktiven Teilern in die Brückenmeßtechnik brachte durch die außergewöhnliche Stabilität der Parameter dieser Teiler eine wesentliche Verbesserung der Auflösung sowie der Reproduzierbarkeit und damit verbunden eine spürbare Verringerung der Meßunsicherheit. Für die Präzisionsmessung von Kondensatoren im Niederspannungsbereich werden deshalb weitgehend nur noch induktive Teilerbrücken, die durch die schnelle Entwicklung der elektronischen Rechentechnik immer häufiger als halb- bzw. automatische Meßbrücken hergestellt werden, eingesetzt. Bei der Messung wird hierbei stets, ebenso wie bei den schon vorgestellten Brückenschaltungen, die Kapazität und der Verlustfaktor des zu messenden Kondensators von der entsprechenden Größe eines Vergleichskondensators abgeleitet. Diese Eigenschaft der Zurückführung der Größen des Meßobjektes auf bekannte Größen eines Vergleichsnormals ist allen Brückenschaltungen gemeinsam. Hieraus resultiert die Notwendigkeit, daß für exakte Messungen, bzw. zur Kalibrierung von Meßbrücken stets Maßverkörperungen mit bekannten technischen Parametern vorhanden sein müssen. So führte die fortschreitende Entwicklung verlustarmer dielektrischer Materialien, Isolierstoffe und Kabel in den letzten Jahren zu gestiegenen Forderungen an die Verlustfaktormessungstechnik, sowohl bei der Messung und Darstellung des Verlustfaktors, als auch bei der Bewahrung und Weitergabe des Verlustfaktors mit Hilfe von Verlustfaktormaßverkörperungen. Hierdurch entstand in der Volkswirtschaft ein zunehmender Bedarf an veränderbaren Verlustfaktormaßverkörperungen, mit denen eine leichte und schnelle Kalibrierung von automatischen Meßbrücken durchgeführt werden kann.

Eine für die Präzisionsmessung der Kapazität und des Verlustfaktors von Kondensatoren sehr gut geeignete induktive Teilermeßbrücke basiert auf dem Prinzip der Thomsonmeßbrücke (Eckardt, H.; Hornemann, D.: Entwicklung von Verlustfaktormessmitteln für den Niederspannungsbereich. Metrologische Abhandlungen, Berlin 5 1985 2, S. 151, Abb. 2). Diese Meßbrücke enthält neben den induktiven Spannungsteilern für die Hauptbrücke und den Thomsonzweig zur Eliminierung der Erdkapazitäten innerhalb der Brücke auch einen induktiven Spannungsteiler im Wagnerschen Hilfszweig. Dadurch wird erreicht, daß nach dem Abgleich der Meßbrücke die Kapazität und der Verlustfaktor des zu messenden Kondensators, unter Berücksichtigung der Kapazität und des Verlustfaktors vom Vergleichsnormal, aus dem Teilungsverhältnis des Hauptteilers und der Einstellung eines RC-Gliedes, welches ein Maß für die Differenz zwischen dem Verlustfaktor des Prüflings und dem Verlustfaktor des Normals ist, berechnet werden kann. Zur Ausführung der Messung ist dabei der zu messende Kondensator in den Zweig 1 und das Vergleichsnormal in den Zweig 2 der Brücke zu schalten. Hierbei muß der Verlustfaktor des Vergleichsnormals so ausgewählt werden, daß er kleiner als der Verlustfaktor des Prüflings ist. Außerdem ist die Abschirmung des Prüflings und des Vergleichsnormals mit dem zentralen Massepunkt der Brücke zu verbinden. Bei sorgfältigstem konstruktiven Aufbau der Meßbrücke sowie durch Einsatz von hochstabilen Bauelementen in der Meßbrücke wird die Meßunsicherheit dieser Brücke hauptsächlich durch die Kenntnis der Kapazität und des Verlustfaktors vom Vergleichsnormal bestimmt. Somit besteht die Notwendigkeit, daß für exakte Verlustfaktormessungen stets Verlustfaktormaßverkörperungen mit bekannten und stabilen technischen Parametern vorhanden sein müssen.

Ziel der Erfindung

Das Ziel der Erfindung ist es, eine passive Schaltung zu schaffen, mit der veränderbare Verlustfaktormaßverkörperungen realisiert werden können, welche sich dadurch auszeichnen, daß mit handelsüblichen und preisgünstigen Kondensatoren sowohl große als auch sehr kleine Verlustfaktorwerte darstellbar sind. Hierbei soll, für eine vorgegebene Zahl von Verlustfaktorwerten und Betriebsfrequenzen, die erforderliche Anzahl von Widerständen, gegenüber Lösungen nach dem bekannten Stand der Technik, wesentlich reduziert und der Zeitaufwand zum Abgleich der einzelnen Verlustfaktorwerte erheblich verringert werden. Gleichzeitig soll die Qualität der Verlustfaktormaßverkörperungen hohen Ansprüchen genügen.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Aufgabe der Erfindung ist es, die erfindungsgemäßen Voraussetzungen zu schaffen, daß mit handelsüblichen Kondensatoren, deren Eigenverlustfaktor $> 10^{-4}$ beträgt, schaltbare Verlustfaktormaßverkörperungen realisiert werden können, deren Verlustfaktorwerte im Bereich von $\leq 1 \cdot 10^{-5}$ bis 1 eingestellt und die mit geringem Zeitaufwand für Abgleicharbeiten sehr genau auf gewünschte Verlustfaktornennwerte abgeglichen werden können. Hierbei soll die zeitliche Konstanz der Verlustfaktorwerte über längere Zeiträume (Jahre) gewährleistet sein. Ebenso soll die Anzahl der benötigten Bauelemente und schaltungstechnischen Arbeiten gegenüber bekannten Lösungen verringert werden. Insgesamt sollen die erfindungsgemäßen Voraussetzungen für eine ökonomische Herstellung veränderbarer Verlustfaktormaßverkörperungen geschaffen werden. Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß der relativ große und die Realisierung kleiner Verlustfaktorwerte verhindernde Eigenverlustfaktor von handelsüblichen Kondensatoren auf einen sehr kleinen ($< 10^{-5}$) und damit für die Darstellung größerer Verlustfaktorwerte vernachlässigbaren Wert kompensiert wird. Hierzu werden zwei in Reihe geschaltete konstante Kondensatoren C durch einen Widerstand R_1 zu einer T-Schaltung ergänzt. Durch Abgleich des genannten Widerstandes wird erreicht, daß der Gesamtverlustfaktor dieser Schaltung nahezu Null ist. Zur Realisierung der größeren Verlustfaktorwerte wird der Wert eines konstanten Widerstandes R_2 über einen Transformator, der in Reihe oder parallel zu dieser T-Schaltung geschaltet ist, herunter oder hoch transformiert. Durch die Veränderung des Widerstandsübersetzungsverhältnisses $\bar{u}$ mit entsprechenden Anzapfungen der Gesamtwicklung des Transformators, können die gewünschten Verlustfaktorwerte eingestellt werden. Die Berechnung des hierfür jeweils benötigten Übersetzungsverhältnisses gestaltet sich, da es nur durch den gewünschten Verlustfaktorwert selbst, die Betriebsfrequenz, die Kapazitätswerte der beiden Kondensatoren sowie durch den zu transformierenden Widerstand bestimmt wird, sehr einfach. Eine Berücksichtigung der Eigenverlustfaktoren der beiden Kondensatoren C ist, wegen der durchgeführten Kompensation nicht erforderlich. Weiterhin kann, durch den Einsatz eines Transformators zur Widerstandstransformation sowie bei Auswahl eines hochwertigen konstanten Widerstandes für R_2 die Stabilität der einzelnen Verlustfaktorwerte über lange Zeiträume garantiert werden. Zum Abgleich der Verlustfaktormaßverkörperungen ist nur, in Abhängigkeit vom Eigenverlustfaktor der Kondensatoren C, der Abgleich des Widerstandes R_1 erforderlich. Hierdurch wird die Abgleicharbeit im Vergleich zu bekannten technischen Lösungen erheblich verringert.

Ausführungsbeispiele

Nachstehend soll die Erfindung an zwei Ausführungsbeispielen näher erläutert werden. Erfindungsgemäß werden nach Figur 1 zwei Kondensatoren gleichen Kapazitätsnennwertes C und etwa gleichen Verlustfaktorwertes $\tan \delta$ mit einem veränderbaren Widerstand R_1 und einem Transformator, an dessen Gesamtwicklung W_2 der Widerstand R_2 geschaltet ist, zu einer T-Schaltung zusammengeschaltet. Die Gesamtwicklung des Transformators besitzt mehrere Anzapfungen, so daß zur Einstellung verschiedener Verlustfaktorwerte die Teilwicklung W_1 verändert werden kann.

Zur Realisierung der veränderbaren Verlustfaktormaßverkörperung muß die beschriebene Schaltung entsprechend Figur 1 zur elektrischen Abschirmung in ein entsprechendes Gehäuse eingebaut, der Fußpunkt des Widerstandes R_1 mit dem Gehäuse verbunden und das Gehäuse geerdet werden. Somit stellt die beschriebene Schaltung eine Verlustfaktormaßverkörperung in der Schaltungsart C_{12} dar. Das heißt die Kapazität C_{12} , deren Verlustfaktor $\tan \delta$ durch Variieren der Windungszahl W_1 verändert werden kann, wirkt zwischen den Klemmen 1 und 2, während zwischen den Klemmen 1 und 0 bzw. 2 und 0 die Erdkapazitäten C_{10} sowie C_{20} und deren Verlustfaktoren $\tan \delta_{10}$ sowie $\tan \delta_{20}$ wirksam sind.

Zur Berechnung der genannten Kapazitäten und Verlustfaktoren muß die T-Schaltung der Figur 1 mit den Leitwerten

$$Y^L = \omega C (\tan \delta + j), \quad (4)$$

$$Y_1^L = \frac{1}{R_1} \quad (5)$$

und

$$Y_2^L = \frac{W_2^2}{W_1^2 R_2} = \frac{1}{\bar{u}^2 R_2} \quad (6)$$

in ihre äquivalente π -Schaltung gemäß der Figur 2 umgerechnet werden. Hierbei wird davon ausgegangen, daß die T-Schaltung bestehend aus den beiden Kapazitäten C und dem Widerstand R_1 , durch Abgleich des genannten Widerstandes, so eingestellt wird, daß die zwischen den Punkten 1 und 2 wirkende Kapazität einen Verlustfaktor von Null hat und daß der Eigenverlustfaktor der Kondensatoren C max. 10^{-3} beträgt. Nach Ausführung der Stern-Dreieck-Transformation ergeben sich damit für die Leitwerte der Ersatzschaltung entsprechend der Figur 2 folgende Beziehungen:

$$Y_{12}^L = \omega C_{12} (\tan \delta_{12} + j) = \frac{\omega C (2 \tan \delta + j)}{2(1 + \omega C \bar{u}^2 R_2 \tan \delta) + j \omega C \bar{u}^2 R_2} \quad (7)$$

$$Y_{10}^L = \omega C_{10} (\tan \delta_{10} + j) = \omega C \tan \delta \left[(1 + j \tan \delta) - \frac{\omega C \bar{u}^2 R_2 (\tan \delta - j)}{2(1 + \omega C \bar{u}^2 R_2 \tan \delta) + j \omega C \bar{u}^2 R_2} \right] \quad (8)$$

und

$$Y_{20}^I = \omega C_{20}(\tan \delta_{20} + j) = \frac{2\omega C \tan \delta (1 + j \tan \delta)}{2(1 + \omega C \bar{u}^2 R_2 \tan \delta) + j \omega C \bar{u}^2 R_2} \quad (9)$$

Für die einzelnen Elemente der π -Ersatzschaltung sind daraus folgend die Beziehungen

$$C_{12} = \frac{C}{2(1 + \tan^2 \delta_{12})} \quad (10)$$

mit

$$\tan \delta_{12} = \frac{\omega C \bar{u}^2 R_2}{2} \quad (11)$$

sowie

$$C_{10} = C \tan^2 \delta + \frac{C \tan \delta \tan \delta_{12}}{1 + (\tan \delta_{12} - \tan \delta)^2} \quad (12)$$

mit

$$\tan \delta_{10} = \frac{1 + \tan \delta_{12}(\tan \delta_{12} - \tan \delta)}{\tan \delta_{12} + \tan \delta} \quad (13)$$

und

$$C_{20} = \frac{C \tan \delta (\tan \delta - \tan \delta_{12})}{1 + (\tan \delta - \tan \delta_{12})^2} \quad (14)$$

mit

$$\tan \delta_{20} = \frac{1}{\tan \delta - \tan \delta_{12}} \quad (15)$$

gültig. Zwischen den Klemmen 1 und 2 der Gesamtschaltung wirkt somit, wie Gl. (10) zeigt, eine Kapazität, für die näherungsweise die Gleichung

$$C_{12} = \frac{C}{2} \quad (16)$$

gilt. Der zwischen den genannten Klemmen wirkende Verlustfaktor kann entsprechend der Gl. (11) sehr einfach berechnet werden, wodurch für ausgewählte Verlustfaktoren eine schnelle Dimensionierung der Schaltung möglich ist. Die Analyse der Gleichungen (12) bis (15) zeigt, daß zwischen den Klemmen 1 und 0 bzw. 2 und 0 sehr kleine Kapazitäten mit einem Verlustfaktor wesentlich größer eins wirksam sind. Das bedeutet, daß zwischen den genannten Klemmen der Einfluß ohmscher Widerstände überwiegt.

Die in der Figur 1 dargestellte Schaltung kann in jenem Kapazitäts- und Frequenzbereich vorteilhaft eingesetzt werden, in dem die zwischen den Punkten 2 und 2' vorhandenen Kontakt- und Wicklungswiderstände keine unzulässigen Fehler verursachen. In jenem Bereich, in dem die genannten Widerstände zu nicht vernachlässigbaren Fehlern führen, ist die in der Figur 3 dargestellte Schaltung anwendbar. Erfindungsgemäß wird hier die Gesamtwicklung W_1 des Transformators parallel zur T-Schaltung, wiederum bestehend aus zwei Kondensatoren, mit dem Kapazitätswert C und dem Verlustfaktor $\tan \delta$ sowie dem veränderbaren Widerstand R_1 , geschaltet. Die Gesamtwicklung des Transformators besitzt auch hier mehrere Anzapfungen, so daß zur Einstellung verschiedener Verlustfaktorwerte die Teilwicklung W_2 , an der der Widerstand R_2 geschaltet ist, verändert werden kann. Entsprechend der Figur 3 muß, wie oben dargestellt, die gesamte Schaltung elektrisch abgeschirmt und der Widerstand R_1 mit Masse verbunden werden.

Zur Berechnung der zwischen den Klemmen 1 und 2 wirkenden Kapazität und deren Verlustfaktor muß die Schaltung ebenfalls ihre äquivalente π -Ersatzschaltung entsprechend der Figur 2 umgerechnet werden. Bei der Umrechnung wird auch hier davon ausgegangen, daß die T-Schaltung bestehend aus den beiden Kondensatoren C und dem Widerstand R_1 so abgeglichen wird, daß dieser Teil der Schaltung einen Verlustfaktor von Null hat und daß der Eigenverlustfaktor der Kondensatoren $\leq 10^{-3}$ beträgt. Ausgehend von der Gl. (4) bis (6) ergeben sich damit für die Leitwerte der π -Ersatzschaltung entsprechend der Figur 2 folgende Gleichungen:

$$Y_{12}^I = \omega C_{12}(\tan \delta_{12} + j) = \omega C \tan^3 \delta + \frac{1}{\bar{u}^2 R_4} + j \frac{\omega C}{2}, \quad (17)$$

$$Y_{10}^I = \omega C_{10}(\tan \delta_{10} + j) = \omega C \tan \delta (1 + j \tan \delta) \quad (18)$$

und

$$Y_{20}^I = \omega C_{20}(\tan \delta_{20} + j) = \omega C \tan \delta (1 + j \tan \delta). \quad (19)$$

Daraus folgend sind für die Elemente der Ersatzschaltung die Beziehungen

$$C_{12} = \frac{C}{2}, \quad (20)$$

$$\tan \delta_{12} = \frac{2}{\omega C \bar{U}^2 R_2}, \quad (21)$$

$$C_{10} = C \tan^2 \delta, \quad (22)$$

$$\tan \delta_{10} = \frac{1}{\tan \delta}, \quad (23)$$

$$C_{20} = C \tan^2 \delta, \quad (24)$$

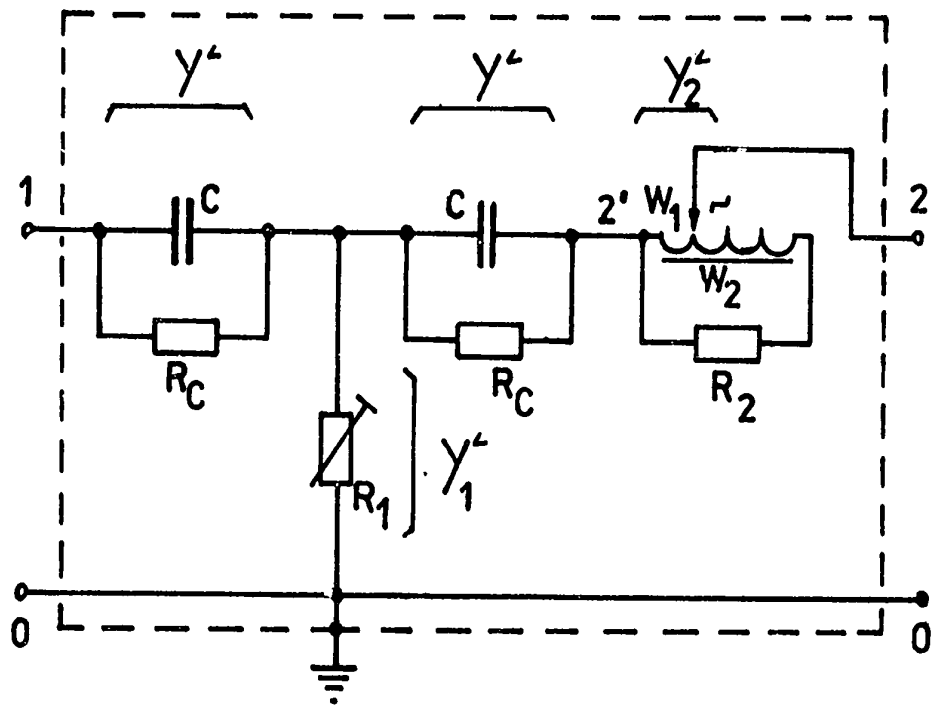
und

$$\tan \delta_{20} = \frac{1}{\tan \delta}, \quad (25)$$

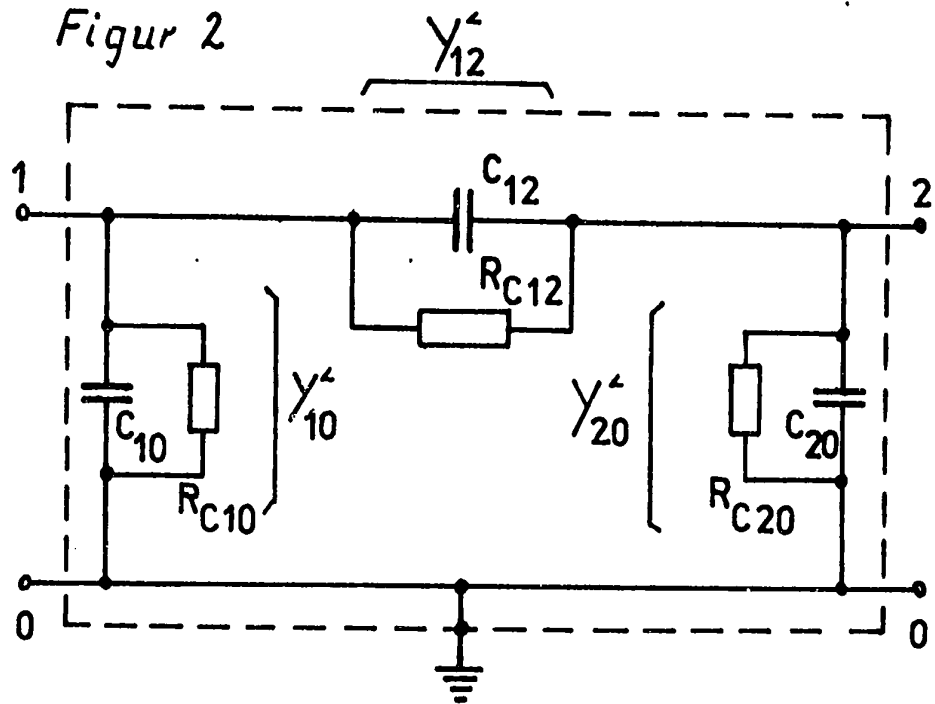
gültig. Somit sind auch bei der Schaltung der Figur 3 die zwischen den Klemmen 1 und 2 wirkende Kapazität und deren Verlustfaktor sehr leicht zu berechnen und damit die Schaltung sehr schnell zu dimensionieren, während zwischen den Klemmen 1 und 0 sowie 2 und 0 auch hier überwiegend ohmsche Widerstände wirksam sind.

Die in der Figur 3 dargestellte Schaltung ist besonders in jenem Kapazitäts- und Frequenzbereich geeignet, in dem der Verlustfaktor überwiegend durch Reihenverluste verursacht wird.

Figur 1



Figur 2



Figur 3

