



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2009 026 885.5**

(22) Anmeldetag: **10.06.2009**

(43) Offenlegungstag: **16.12.2010**

(51) Int Cl.⁸: **H03H 11/12** (2006.01)

(71) Anmelder:

**Endress + Hauser GmbH + Co. KG, 79689
Maulburg, DE**

(72) Erfinder:

**Grozinger, Roland, 79219 Staufen, DE; Kempa,
Arnd, 79585 Steinen, DE**

(74) Vertreter:

**Andres, A., Dipl.-Phys., Pat.-Anw., 79415 Bad
Bellingen**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:

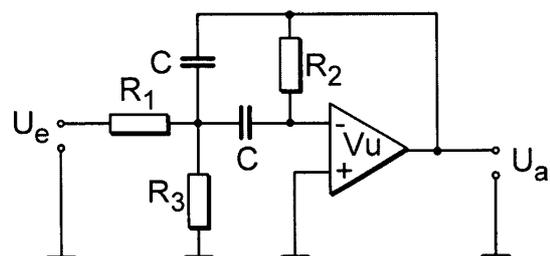
DE 20 23 019 A
US 37 27 131 A
WO 08/0 66 552 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Analoges Filter mit einstellbarer Filterfrequenz**

(57) Zusammenfassung: Es ist ein rauscharmes analoges Filter mit einstellbarer Filterfrequenz beschrieben, mit einem Schwingkreis, dessen Resonanzfrequenz (f_0) gleich der Filterfrequenz des Filters ist, der einen ersten Schaltungszweig (S1) aufweist, in dem ein erstes frequenzbestimmendes Element angeordnet ist, der einen parallel oder in Serie zu dem ersten Schaltungszweig (S1) geschalteten zweiten Schaltungszweig (S2) aufweist, in dem ein zweites frequenzbestimmendes Element angeordnet ist, wobei eines der frequenzbestimmenden Elemente eine Kapazität (C) und das andere eine Induktivität (L) ist, und einem in einen der beiden Schaltungszweige (S1 oder S2) eingesetzten Verstärker (OPV₁ oder OPV₂) mit einstellbarer Verstärkung (V_L oder V_C), dessen Ausgang über das in diesem Schaltungszweig (S1 oder S2) angeordnete frequenzbestimmende Element mit dessen invertierendem Eingang verbunden ist, und der im Filterbetrieb eine über das in diesem Schaltungszweig (S1, S2) angeordnete frequenzbestimmende Element anliegende Spannung der eingestellten Verstärkung (V_L oder V_C) entsprechend verstärkt und dadurch eine entsprechende Veränderung eines durch dieses frequenzbestimmende Element fließenden Stroms bewirkt.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein analoges Filter mit einstellbarer Frequenz. Hierzu zählen Bandpassfilter mit einstellbarer Mittenfrequenz und Bandsperren mit einstellbarer Sperrfrequenz.

[0002] Es gibt eine Vielzahl von elektronischen Schaltungen, in denen analoge Filter mit einstellbarer Frequenz eingesetzt werden.

[0003] Ein typisches Beispiel sind Schaltungen von Messgeräten, in denen diese Filter beispielsweise zur Filterung von mit einem Sensor aufgenommenen Messsignalen verwendet werden.

[0004] Hierzu zählen mit Ultraschall arbeitende Füllstandsmessgeräte, bei denen vorzugsweise bei deren Resonanzfrequenz betriebene Ultraschallsensoren kurze Ultraschallwellenimpulse in Richtung des Füllguts senden und deren von der Oberfläche des Füllguts zum Sensor zurück reflektierten Echosignale nach einer vom Füllstand abhängigen Laufzeit empfangen. Dabei wird vom Sensor nicht nur das gewünschte die Resonanzfrequenz aufweisende Nutzsinal empfangen sondern auch Störsignale. Die Störsignale weisen in der Regel von der Resonanzfrequenz verschiedene Störfrequenzen auf, und werden durch entsprechende Filterung unterdrückt. Hierzu wird aus dem Empfangssignal des Sensors mittels eines auf die Resonanzfrequenz des Ultraschallsensors abgestimmten Bandpassfilters ein Messsignal herausgefiltert. Die Resonanzfrequenzen sind jedoch von Sensor zu Sensor unterschiedlich und in der Regel von der Temperatur abhängig. Um den gesamten Bereich der möglicher Weise auftretenden Resonanzfrequenzen abdecken zu können, werden hier beispielsweise Bandpässe mit einer festen Mittenfrequenz und einer sehr großen Bandbreite eingesetzt. Dabei ist die Störsignalunterdrückung jedoch umso schlechter, je größer die Bandbreite des Bandpasses ist.

[0005] Alternativ werden einstellbare Bandpassfilter eingesetzt. Ein Beispiel sind aktive Bandpässe mit Mehrfachgegenkopplung, bei denen die Mittenfrequenz über veränderbare Widerstände einstellbar ist. [Fig. 1](#) zeigt ein Ausführungsbeispiel hierzu. Dort liegt eine auf ein Bezugspotential bezogene Eingangsspannung U_e über einen ersten Widerstand R_1 und einen in Reihe dazu geschalteten ersten Kondensator C an einem invertierenden Eingang eines Verstärkers V_u mit konstanter Verstärkung an. Der nicht invertierende Eingang des Verstärkers V_u liegt an dem Bezugspotential an. Ein Ausgangssignal des Verstärkers V_u wird über einen zweiten Kondensator C gleicher Kapazität auf einen ersten zwischen dem ersten Widerstand R_1 und dem ersten Kondensator C befindlichen Abgriff und parallel dazu über einen zweiten Widerstand R_2 auf einen zweiten zwischen dem

ersten Kondensator C und dem invertierenden Eingang befindlichen Abgriff zurückgeführt. Zusätzlich liegt der erste Abgriff über einen dritten Widerstand R_3 an dem Bezugspotential an. Ausgangssignal dieses Bandpassfilters ist die am Ausgang des Verstärkers V_u vorliegende Ausgangsspannung U_a bezogen auf das Bezugspotential. Diese Filter weisen jedoch aufgrund der Widerstände ein hohes Rauschen auf, das gerade bei der Filterung von Messsignalen, wie sie z. B. bei Ultraschall Füllstandsmessgeräten ausgeführt wird, sehr störend ist.

[0006] Demgegenüber weisen passive Filter ein sehr viel geringeres Rauschen auf. Dort besteht jedoch der Nachteil, dass die Filterfrequenz nur durch zu- oder wegschalten von die Filterfrequenz bestimmenden Induktivitäten und Kapazitäten, bzw. durch mechanisch verstellbare Induktivitäten und Kapazitäten verändert werden kann. Ein solches einstellbares Filter ist beispielsweise in der DE 10 2006 052 873 A1 beschrieben. Kernstück des dort beschriebenen Filters ist ein LC-Schwingkreis, der eine Induktivität und eine verstimmbare Kapazität, insb. eine Varaktordiode, umfasst. Varaktordioden weisen jedoch kleine Kapazitäten, z. B. in der Größenordnung von einigen Pikofarad auf, so dass diese Filter nur zur Filterung von Signalen mit sehr hohen Frequenzen geeignet sind.

[0007] Es ist eine Aufgabe der Erfindung ein rauscharmes analoges Filter mit einstellbarer Filterfrequenz anzugeben.

[0008] Hierzu besteht die Erfindung in einem analogen Filter mit einstellbarer Filterfrequenz mit

- einem Schwingkreis,
- dessen Resonanzfrequenz gleich der Filterfrequenz des Filters ist,
- der einen ersten Schaltungszweig aufweist, in dem ein erstes frequenzbestimmendes Element angeordnet ist,
- der einen parallel oder in Serie zu dem ersten Schaltungszweig geschalteten zweiten Schaltungszweig aufweist, in dem ein zweites frequenzbestimmendes Element angeordnet ist, wobei
- eins der frequenzbestimmenden Elemente eine Kapazität und das andere eine Induktivität ist, und
- einem in einen der beiden Schaltungszweige eingesetzten Verstärker mit einstellbarer Verstärkung,
- dessen Ausgang über das in diesem Schaltungszweig angeordnete frequenzbestimmende Element mit dessen invertierendem Eingang verbunden ist, und
- der im Filterbetrieb eine über das in diesem Schaltungszweig angeordnete frequenzbestimmende Element anliegende Spannung der eingestellten Verstärkung entsprechend verstärkt und dadurch eine entsprechende Veränderung eines durch dieses frequenzbestimmende Element flie-

ßenden Stroms bewirkt.

[0009] Gemäß einer ersten Ausgestaltung ist die eingestellte Verstärkung größer als 1 und der Verstärker erhöht den durch das frequenzbestimmende Element fließenden Strom.

[0010] Gemäß einer zweiten Ausgestaltung ist die eingestellte Verstärkung kleiner als 1 und der Verstärker erniedrigt den durch das frequenzbestimmende Element fließenden Strom.

[0011] Gemäß einer ersten Variante

- ist der Filter ein Bandpassfilter und die Filterfrequenz ist dessen Mittenfrequenz, und
- ist der Schwingkreis ein Parallelschwingkreis, in dem der erste und der zweite Schaltungszweig parallel geschaltet sind

[0012] Weiter umfasst die Erfindung eine Weiterbildung der ersten Variante, bei der

- in dem anderen Schaltungszweig ebenfalls ein Verstärker mit einstellbarer Verstärkung eingesetzt ist,
- dessen Ausgang über das in diesem Schaltungszweig angeordnete frequenzbestimmende Element mit dessen invertierendem Eingang verbunden ist, und
- der im Filterbetrieb eine über das in diesem Schaltungszweig angeordnete frequenzbestimmende Element anliegende Spannung der eingestellten Verstärkung entsprechend verstärkt und dadurch eine entsprechende Veränderung eines durch dieses frequenzbestimmende Element fließenden Stroms bewirkt.

[0013] Gemäß einer zweiten Variante

- ist der Filter eine Bandsperre und die Filterfrequenz ist dessen Sperrfrequenz, und
- ist der Schwingkreis ein Serienschwingkreis, in dem der erste und der zweite Schaltungszweig in Serie geschaltet sind.

[0014] Gemäß einer Ausgestaltung ist ein Ausgangssignal des Filters eine Ausgangsspannung, die über den Schwingkreis abfällt.

[0015] Gemäß einer weiteren Ausgestaltung ist ein Eingangssignal des Filters eine Eingangsspannung, die über einen dritten dem Schwingkreis in Serie vorgeschalteten Schaltungszweig, in dem ein Widerstand angeordnet ist, an dem Schwingkreis anliegt.

[0016] Gemäß einer anderen Ausgestaltung ist ein Eingangssignal des Filters ein Eingangsstrom, und dem Schwingkreis ist ein weiterer Schaltungszweig vorgeschaltet, der parallel zum Schwingkreis geschaltet ist, und in dem ein Widerstand angeordnet ist.

[0017] Die Erfindung und weitere Vorteile werden nun anhand der Figuren der Zeichnung, in denen zehn Ausführungsbeispiele dargestellt sind, näher erläutert; gleiche Elemente sind in den Figuren mit gleichen Bezugszeichen versehen.

[0018] [Fig. 1](#) zeigt: einen aus dem Stand der Technik bekannten aktiven Bandpassfilter mit Mehrfachgegenkopplung;

[0019] [Fig. 2](#) zeigt: eine erste Ausführung eines erfindungsgemäßen Bandpassfilters, mit einem Parallelschwingkreis, in dem eine über eine Induktivität des Parallelschwingkreises anliegende Spannung mittels eines einstellbaren Verstärkers verstärkt wird und dadurch eine entsprechende Veränderung eines durch die Induktivität fließenden Stroms bewirkt wird;

[0020] [Fig. 3](#) zeigt: eine zweite Ausführung eines erfindungsgemäßen Bandpassfilters, mit einem Parallelschwingkreis, in dem eine über eine Kapazität des Parallelschwingkreises anliegende Spannung mittels eines einstellbaren Verstärker verstärkt wird und dadurch eine entsprechende Veränderung eines durch die Kapazität fließenden Stroms bewirkt wird;

[0021] [Fig. 4](#) zeigt: eine dritte Ausführung eines erfindungsgemäßen Bandpassfilters, mit einem Parallelschwingkreis, bei dem in beiden Schaltungszweigen jeweils ein Verstärker angeordnet ist;

[0022] [Fig. 5](#) zeigt: eine erste Ausführung einer erfindungsgemäßen Bandsperre, mit einem Serienschwingkreis, in dem eine über eine Induktivität des Serienschwingkreises anliegende Spannung mittels eines einstellbaren Verstärker verstärkt wird und dadurch eine entsprechende Veränderung eines durch die Induktivität fließenden Stroms bewirkt wird;

[0023] [Fig. 6](#) zeigt: eine zweite Ausführung einer erfindungsgemäßen Bandsperre, mit einem Serienschwingkreis, in dem eine über eine Kapazität des Serienschwingkreises anliegende Spannung mittels eines einstellbaren Verstärker verstärkt wird und dadurch eine entsprechende Veränderung eines durch die Kapazität fließenden Stroms bewirkt wird;

[0024] [Fig. 7](#) zeigt: einen über eine Stromquelle gespeisten erfindungsgemäßen Filter gemäß [Fig. 2](#);

[0025] [Fig. 8](#) zeigt: einen über eine Stromquelle gespeisten erfindungsgemäßen Filter gemäß [Fig. 3](#);

[0026] [Fig. 9](#) zeigt: einen über eine Stromquelle gespeisten erfindungsgemäßen Filter gemäß [Fig. 4](#);

[0027] [Fig. 10](#) zeigt: einen über eine Stromquelle gespeisten erfindungsgemäßen Filter gemäß [Fig. 5](#);

[0028] [Fig. 11](#) zeigt: einen über eine Stromquelle

gespeisten erfindungsgemäßen Filter gemäß [Fig. 6](#);

[0029] [Fig. 12](#) zeigt: das Quadrat der spektralen Energiedichte des Rauschens des in [Fig. 2](#) dargestellten erfindungsgemäßen passiven Bandpassfilters in Abhängigkeit von der Frequenz; und

[0030] [Fig. 13](#) zeigt: das Quadrat der spektralen Energiedichte des Rauschens des in [Fig. 1](#) dargestellten herkömmlichen aktiven Bandpassfilters in Abhängigkeit von der Frequenz.

[0031] [Fig. 2](#), [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) zeigen drei Ausführungsbeispiele einer ersten Variante eines erfindungsgemäßen passiven analogen Filters mit einstellbarer Filterfrequenz.

[0032] Die dort dargestellten Filter sind Bandpassfilter und die Filterfrequenz ist die Mittenfrequenz des Bandpassfilters. Kernstück der Filter ist jeweils ein Schwingkreis, dessen Resonanzfrequenz f_0 gleich der Filterfrequenz des jeweiligen Filters ist. Der Schwingkreis weist zwei parallel zueinander geschaltete Schaltungszweige S1, S2 auf, in denen jeweils ein frequenzbestimmendes Element angeordnet ist, von denen eins eine Induktivität L und eins eine Kapazität C ist. In den hier dargestellten Bandpassfiltern ist in dem ersten Schaltungszweig S1 die Induktivität L und in dem parallel dazu geschalteten zweiten Schaltungszweig S2 die Kapazität C angeordnet.

[0033] Beide Schaltungszweige S1, S2 sind eingangsseitig an einen dritten Schaltungszweig S3 angeschlossen, in dem ein Widerstand R angeordnet ist. Ein Eingangssignal des Filters, hier eine auf ein festes Bezugspotential, z. B. Masse, bezogene Eingangsspannung U_e , liegt über diesen dritten Schaltungszweig S3 eingangsseitig an dem Parallelschwingkreis an. Der zweite und der dritte Schaltungszweig S2, S3 liegen ausgangsseitig ebenfalls an diesem festen Bezugspotential. Am Ausgang des Filters steht die über den Schwingkreis abfallende auf das Bezugspotential bezogene Ausgangsspannung U_a als gefiltertes Ausgangssignal zur Verfügung.

[0034] Erfindungsgemäß ist in einen der beiden Schaltungszweige S1 oder S2 ein Verstärker OPV₁ bzw. OPV₂ mit einstellbarer Verstärkung V_L bzw. V_C eingesetzt, dessen Ausgang über das in diesem Schaltungszweig S1, S2 angeordnete frequenzbestimmende Element an dessen invertierenden Eingang angeschlossen ist. Der nicht invertierende Eingang des Verstärkers OPV₁ bzw. OPV₂ ist an das Bezugspotential angeschlossen. Der Verstärker OPV₁ bzw. OPV₂ verstärkt im Filterbetrieb eine über das in diesem Schaltungszweig S1 oder S2 angeordnete frequenzbestimmende Element abfallende Spannung entsprechend der eingestellten Verstärkung V_L bzw. V_C und bewirkt dadurch eine entsprechende Veränderung eines durch dieses frequenzbe-

stimmende Element fließenden Stroms. Ist die eingestellte Verstärkung V_L bzw. V_C größer als 1, so wird durch den Verstärker OPV₁ bzw. OPV₂ der durch das frequenzbestimmende Element fließende Strom erhöht. Ist die eingestellte Verstärkung V_L bzw. V_C kleiner als 1, so wird durch den Verstärker OPV₁ bzw. OPV₂ der durch das frequenzbestimmende Element fließende Strom erniedrigt.

[0035] Der Verstärker OPV₁ bzw. OPV₂ ist vorzugsweise ein Operationsverstärker, dessen Verstärkung V_L bzw. V_C beispielsweise mittels eines hier durch einen Pfeil symbolisierten digitalen Potentiometers einstellbar ist.

[0036] Bei dem in [Fig. 2](#) dargestellten Ausführungsbeispiel ist der Verstärker OPV₁ in den ersten Schaltungszweig S1 eingesetzt und an die Induktivität L angeschlossen. Diese Kombination aus Induktivität L und Verstärker OPV₁ wirkt damit wie eine einstellbare Induktivität L_{eff} der Größe:

$$L_{eff} = \frac{L}{V_L + 1}$$

[0037] Hierdurch ergibt sich eine über die Verstärkung V_L einstellbare Resonanzfrequenz f_0 des Parallelschwingkreises von:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{LC}{V_L + 1}}}$$

[0038] Die Mittenfrequenz dieses Bandpassfilter ist gleich der Resonanzfrequenz f_0 dieses Schwingkreises und anhand der Verstärkung V_L automatisch einstellbar.

[0039] Für die Bandbreite B des in [Fig. 2](#) dargestellten Bandpassfilters gilt:

$$B = \frac{1}{2\pi RC}$$

[0040] Die Bandbreite B ist damit über den Widerstand R unabhängig von der Resonanzfrequenz f_0 des Filters einstellbar.

[0041] Bei dem in [Fig. 3](#) dargestellten Ausführungsbeispiel ist der Verstärker OPV₂ in den zweiten Schaltungszweig S2 eingesetzt und an die Kapazität C angeschlossen. Diese Kombination aus Kapazität C und Verstärker OPV₂ wirkt damit wie eine einstellbare Kapazität C_{eff} der Größe:

$$C_{eff} = C(V_C + 1)$$

[0042] Hierdurch ergibt sich eine über die Verstärkung V_C einstellbare Resonanzfrequenz f_0 des Parallelschwingkreises von:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC(V_C + 1)}}$$

[0043] Die Mittenfrequenz dieses Bandpassfilter ist gleich der Resonanzfrequenz f_0 dieses Schwingkreises und anhand der Verstärkung V_C automatisch einstellbar.

[0044] Für die Bandbreite B des in [Fig. 3](#) dargestellten Bandpassfilters gilt:

$$B = \frac{1}{2\pi RC(V_C + 1)}$$

[0045] Die Bandbreite B ist damit vom Widerstand R und von der Resonanzfrequenz f_0 des Filters abhängig.

[0046] Bei dem in [Fig. 4](#) dargestellten Ausführungsbeispiel ist sowohl in dem ersten Schaltungsweig S1 als auch in dem zweiten Schaltungsweig S2 jeweils ein Verstärker OPV_1 , OPV_2 mit einstellbarer Verstärkung V_L , V_C eingesetzt, dessen Ausgang über das in dem jeweiligen Schaltungsweig S1, S2 angeordnete frequenzbestimmende Element mit dessen invertierendem Eingang verbunden ist, und der im Filterbetrieb die über das in diesem Schaltungsweig S1, S2 angeordnete frequenzbestimmende Element anliegende Spannung entsprechend der eingestellten Verstärkung V_L , V_C verstärkt und dadurch eine entsprechende Veränderung des durch das jeweilige frequenzbestimmende Element fließenden Stroms bewirkt. Auch hier erhöht sich der jeweilige Strom, wenn die zugehörige Verstärkung V_L bzw. V_C größer als 1 ist, und er erniedrigt sich, wenn die zugehörige Verstärkung V_L bzw. V_C kleiner als 1 ist.

[0047] Damit ergibt sich eine einstellbare Induktivität L_{eff} der Größe:

$$L_{\text{eff}} = \frac{L}{V_L + 1}$$

und eine einstellbare Kapazität C_{eff} der Größe:

$$C_{\text{eff}} = C(V_C + 1)$$

[0048] Dementsprechend ergibt sich eine über die Verstärkungen V_L und V_C einstellbare Resonanzfrequenz f_0 dieses Parallelschwingkreises von:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{LC(V_C + 1)}{V_L + 1}}}$$

[0049] Hierdurch kann ein deutlich größerer Frequenzbereich der einstellbaren Filterfrequenzen abgedeckt werden. Dabei werden die Verstärkungen V_L , V_C gegenläufig gesteuert, damit sich deren Effekte nicht gegenseitig aufheben.

[0050] Für die Bandbreite B des in [Fig. 4](#) dargestellten Bandpassfilters gilt:

$$B = \frac{1}{2\pi RC(V_C + 1)}$$

[0051] [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) zeigen zwei Ausführungsbeispiele einer zweiten Variante eines erfindungsgemäßen passiven analogen Filters mit einstellbarer Filterfrequenz. Die dort dargestellten Filter sind Bandsperren und die Filterfrequenz ist die Sperrfrequenz der Bandsperre. Kernstück der Filter ist auch hier jeweils ein Schwingkreis, dessen Resonanzfrequenz f_0 gleich der Filterfrequenz des jeweiligen Filters ist. Im Unterschied zu den zuvor beschriebenen Ausführungsbeispielen besteht der Schwingkreis hier in einem Serienschwingkreis, der zwei in Serie zueinander geschaltete Schaltungsweige S1, S2 aufweist, in denen jeweils ein frequenzbestimmendes Element angeordnet ist, von denen eins eine Induktivität L und eins eine Kapazität C ist. In den hier dargestellten Bandsperren ist in dem ersten Schaltungsweig S1 die Induktivität L und in dem in Serie dazu geschalteten zweiten Schaltungsweig S2 die Kapazität C angeordnet.

[0052] Den beiden in Serie angeordneten Schaltungsweige S1, S2 ist eingangsseitig ein dritter Schaltungsweig S3 vorgeschaltet, in dem ein Widerstand R angeordnet ist. Das Eingangssignal des Filters ist auch hier eine auf ein festes Bezugspotential, z. B. Masse, bezogene Eingangsspannung U_e , die über diesen dritten Schaltungsweig S3 eingangsseitig an dem Serienschwingkreis anliegt. Der Serienschwingkreis liegt ausgangssseitig ebenfalls an diesem festen Bezugspotential und am Ausgang des Filters steht die über den Schwingkreis abfallende auf das Bezugspotential bezogene Ausgangsspannung U_a als gefiltertes Ausgangssignal zur Verfügung.

[0053] Auch hier ist erfindungsgemäß in einen der beiden Schaltungsweige S1 oder S2 ein Verstärker OPV_1 , OPV_2 mit einstellbarer Verstärkung V_L , V_C eingesetzt, dessen Ausgang über das in diesem Schaltungsweig S1, S2 angeordnete frequenzbestimmende Element an dessen invertierenden Eingang angeschlossen ist. Der nicht invertierende Eingang des Verstärkers OPV_1 bzw. OPV_2 ist an das Bezugspotential angeschlossen. Der Verstärker OPV_1 , OPV_2 verstärkt im Filterbetrieb eine über das in diesem Schaltungsweig S1 oder S2 angeordnete frequenzbestimmende Element abfallende Spannung entsprechend der eingestellten Verstärkung V_L bzw. V_C und bewirkt dadurch eine entsprechende Veränderung des über dieses Element fließenden Stroms. Ist die eingestellte Verstärkung V_L bzw. V_C größer als 1, so wird durch den Verstärker OPV_1 bzw. OPV_2 der durch das frequenzbestimmende Element fließenden Strom erhöht. Ist die eingestellte Verstärkung V_L bzw. V_C kleiner als 1, so wird durch den Verstärker OPV_1 bzw. OPV_2 der durch das frequenzbestimmende Ele-

ment fließenden Strom erniedrigt.

[0054] Der Verstärker OPV₁, OPV₂ ist auch hier vorzugsweise ein Operationsverstärker, dessen Verstärkung V_L , V_C beispielsweise mittels eines hier durch einen Pfeil symbolisierten digitalen Potentiometers einstellbar ist.

[0055] Bei dem in [Fig. 5](#) dargestellten Ausführungsbeispiel ist der Verstärker OPV₁ in den ersten Schaltungszweig S1 eingesetzt und an die Induktivität L angeschlossen. Diese Kombination aus Induktivität L und Verstärker OPV₁ wirkt damit wie eine einstellbare Induktivität L_{eff} der Größe:

$$L_{\text{eff}} = \frac{L}{V_L + 1}$$

[0056] Hierdurch ergibt sich eine über die Verstärkung V_L einstellbare Resonanzfrequenz f_0 des Serienschwingkreises von:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC(V_L + 1)}}$$

[0057] Die Sperrfrequenz dieser Bandsperre ist gleich der Resonanzfrequenz f_0 dieses Schwingkreises und anhand der Verstärkung V_L automatisch einstellbar.

[0058] Mit dem in Serie zu dem Serienschwingkreis geschalteten Widerstand R ergibt sich die Bandbreite B der in [Fig. 5](#) dargestellten Bandsperre zu:

$$B = \frac{R(V_L + 1)}{2\pi L}$$

[0059] Die Bandbreite B ist damit vom Widerstand R und von der Resonanzfrequenz f_0 des Filters abhängig.

[0060] Bei dem in [Fig. 6](#) dargestellten Ausführungsbeispiel ist der Verstärker OPV₂ in den zweiten Schaltungszweig S2 eingesetzt und an die Kapazität C angeschlossen. Diese Kombination aus Kapazität C und Verstärker OPV₂ wirkt damit wie eine einstellbare Kapazität C_{eff} der Größe:

$$C_{\text{eff}} = C(V_C + 1)$$

[0061] Hierdurch ergibt sich eine über die Verstärkung V einstellbare Resonanzfrequenz f_0 des Serienschwingkreises von:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC(V_C + 1)}}$$

[0062] Die Sperrfrequenz dieser Bandsperre ist gleich der Resonanzfrequenz f_0 des Serienschwingkreises und anhand der Verstärkung V_C automatisch

einsetzbar.

[0063] Für die Bandbreite B des in [Fig. 6](#) dargestellten Bandpassfilters gilt:

$$B = \frac{R}{2\pi L}$$

[0064] Die Bandbreite B ist damit über den Widerstand R unabhängig von der Resonanzfrequenz f_0 des Filters einstellbar.

[0065] Anstelle einer Eingangsspannung U_e kann den erfindungsgemäßen analogen Filtern natürlich auch ein Eingangsstrom I_e als Eingangssignal zugeführt werden. In dem Fall entfällt der in Serie zu dem jeweiligen Schwingkreis geschaltete dritte Schaltungszweig S3 mit dem Widerstand R. Stattdessen wird dem jeweiligen Schwingkreis ein weiterer Schaltungszweig S4 vorgeschaltet, der parallel zum Schwingkreis geschaltet ist, und in dem ein Widerstand R angeordnet ist. Dies ist in [Fig. 7](#) am Beispiel des Bandpassfilters von [Fig. 2](#), in [Fig. 8](#) am Beispiel des Bandpassfilters von [Fig. 3](#), in [Fig. 9](#) am Beispiel des Bandpassfilters von [Fig. 4](#), in [Fig. 10](#) am Beispiel der Bandsperre von [Fig. 5](#) und in [Fig. 11](#) am Beispiel der Bandsperre von [Fig. 6](#) dargestellt.

[0066] Die oben für die in den [Fig. 2](#) bis [Fig. 6](#) dargestellten Filter angegebenen Formeln für die einstellbare Induktivität L_{eff} , die einstellbare Kapazität C_{eff} , Resonanzfrequenz f_0 und die Bandbreite B der jeweiligen Filter gelten analog, wobei in den oben angeführten Formeln an die Stelle des in Serie im dritten Schaltungszweig S3 vorgeschalteten Widerstands R der im vierten Schaltungszweig S4 angeordnete Widerstand R tritt.

[0067] Die erfindungsgemäßen Filter weisen den Vorteil auf, dass zur Einstellung der Filterfrequenz, also der Mittenfrequenz der Bandpassfilter bzw. der Sperrfrequenz der Bandsperren nur geringe Verstärkungen V_L , V_C benötigt werden. Des Weiteren werden keine einstellbaren Widerstände benötigt, und über Widerstände abfallende Spannungen bzw. darüber fließende Ströme werden nicht verstärkt. Dementsprechend erfolgt bei den erfindungsgemäßen Filtern auch keine Verstärkung des in Verbindung mit ohmschen Widerständen zwangsläufig auftretenden Rauschens. Entsprechend sind die Filter, insb. im Vergleich zu aktiven Filtern, extrem rauscharm.

[0068] [Fig. 12](#) zeigt in einer doppelt logarithmischen Darstellung das Quadrat der spektrale Energiedichte E^2 in V^2/Hz des Rauschens, hier des Spannungsrauschens, des in [Fig. 2](#) dargestellten erfindungsgemäßen passiven Bandpassfilters in Abhängigkeit von der Frequenz f in Hz über einen Frequenzbereich von 10 kHz bis 100 kHz.

[0069] Im Vergleich dazu zeigt [Fig. 13](#) ebenfalls in

einer doppelt logarithmischen Darstellung das Quadrat der spektrale Energiedichte E^2 in V^2/Hz des Rauschens, hier des Spannungsrauschens, des in [Fig. 1](#) dargestellten herkömmlichen aktiven Bandpassfilters in Abhängigkeit von der Frequenz f in Hz über den gleichen Frequenzbereich.

[0070] Für diesen Vergleich wurden die beiden Filter derart ausgelegt, dass sie die gleiche Mittenfrequenz und die gleiche Bandbreite aufweisen. Die beiden Kurven weisen jeweils bei der Mittenfrequenz ein ausgeprägtes Maximum auf. Wie aus den beiden [Fig. 12](#) und [Fig. 13](#) hervorgeht, liegt die spektrale Energiedichte des Rauschens des erfindungsgemäßen Filters jedoch über den gesamten dargestellten Frequenzbereich deutlich unterhalb der des herkömmlichen aktiven Bandpassfilters. Insb. beträgt der Unterschied in dem relevanten Bereich der Mittenfrequenz in dem dargestellten Vergleich sogar mehr als zwei Zehnerpotenzen.

U_e	Eingangsspannung
U_a	Ausgangsspannung
I_e	Eingangsstrom
L	Induktivität
C	Kapazität
S_1	erster Schaltungszweig
S_2	zweiter Schaltungszweig
S_3	dritter Schaltungszweig
S_4	weiterer Schaltungszweig
OPV_1	Verstärker
OPV_2	Verstärker
R	Widerstand

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 102006052873 A1 [\[0006\]](#)

Patentansprüche

1. Analoges Filter mit einstellbarer Filterfrequenz mit

- einem Schwingkreis,
- dessen Resonanzfrequenz (f_0) gleich der Filterfrequenz des Filters ist,
- der einen ersten Schaltungszweig (S1) aufweist, in dem ein erstes frequenzbestimmendes Element angeordnet ist,
- der einen parallel oder in Serie zu dem ersten Schaltungszweig (S1) geschalteten zweiten Schaltungszweig (S2) aufweist, in dem ein zweites frequenzbestimmendes Element angeordnet ist, wobei
- eins der frequenzbestimmenden Elemente eine Kapazität (C) und das andere eine Induktivität (L) ist, und
- einem in einen der beiden Schaltungszweige (S1 oder S2) eingesetzten Verstärker (OPV₁ oder OPV₂) mit einstellbarer Verstärkung (V_L oder V_C),
- dessen Ausgang über das in diesem Schaltungszweig (S1 oder S2) angeordnete frequenzbestimmende Element mit dessen invertierendem Eingang verbunden ist, und
- der im Filterbetrieb eine über das in diesem Schaltungszweig (S1, S2) angeordnete frequenzbestimmende Element anliegende Spannung der eingestellten Verstärkung (V_L oder V_C) entsprechend verstärkt und dadurch eine entsprechende Veränderung eines durch dieses frequenzbestimmende Element fließenden Stroms bewirkt.

2. Analoges Filter nach Anspruch 1, bei dem die eingestellte Verstärkung (V_L oder V_C) größer als 1 ist, und der Verstärker (OPV₁ oder OPV₂) den durch das frequenzbestimmende Element fließenden Strom erhöht.

3. Analoges Filter nach Anspruch 1, bei dem die eingestellte Verstärkung (V_L oder V_C) kleiner als 1 ist, und der Verstärker (OPV₁ oder OPV₂) den durch das frequenzbestimmende Element fließenden Strom erniedrigt.

4. Analoges Filter nach Anspruch 1, bei dem

- der Filter ein Bandpass ist und die Filterfrequenz dessen Mittenfrequenz ist, und
- der Schwingkreis ein Parallelschwingkreis ist, in dem der erste und der zweite Schaltungszweig (S1, S2) parallel geschaltet sind.

5. Analoges Filter nach Anspruch 4, bei dem

- in den anderen Schaltungszweig (S2 oder S1) ebenfalls ein Verstärker (OPV₂ oder OPV₁) mit einstellbarer Verstärkung (V_C oder V_L) eingesetzt ist,
- dessen Ausgang über das in diesem Schaltungszweig (S2 oder S1) angeordnete frequenzbestimmende Element mit dessen invertierendem Eingang verbunden ist, und
- der im Filterbetrieb eine über das in diesem Schal-

tungszweig (S2 oder S1) angeordnete frequenzbestimmende Element anliegende Spannung der eingestellten Verstärkung (V_C oder V_L) entsprechend verstärkt und dadurch eine entsprechende Veränderung eines durch dieses frequenzbestimmende Element fließenden Stroms bewirkt.

6. Analoges Filter nach Anspruch 1, bei dem

- der Filter eine Bandsperre und die Filterfrequenz dessen Sperrfrequenz ist, und
- der Schwingkreis ein Serienschwingkreis ist, in dem der erste und der zweite Schaltungszweig (S1, S2) in Serie geschaltet sind.

7. Analoges Filter nach Anspruch 1, bei dem ein Ausgangssignal (U_a) des Filters eine Ausgangsspannung ist, die über den Schwingkreis abfällt.

8. Analoges Filter nach Anspruch 1, bei dem ein Eingangssignal des Filters eine Eingangsspannung (U_e) ist, die über einen dritten dem Schwingkreis in Serie vorgeschalteten Schaltungszweig (S3), in dem ein Widerstand (R) angeordnet ist, an dem Schwingkreis anliegt.

9. Analoges Filter nach Anspruch 1, bei dem

- ein Eingangssignal des Filters ein Eingangsstrom (I_e) ist, und
- dem Schwingkreis ein weiterer Schaltungszweig (S4) vorgeschaltet ist,
- der parallel zum Schwingkreis geschaltet ist, und
- in dem ein Widerstand (R) angeordnet ist.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

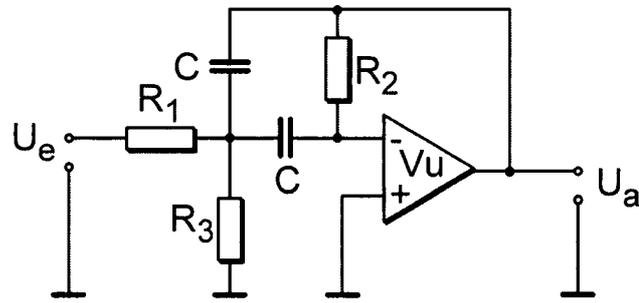


Fig. 1

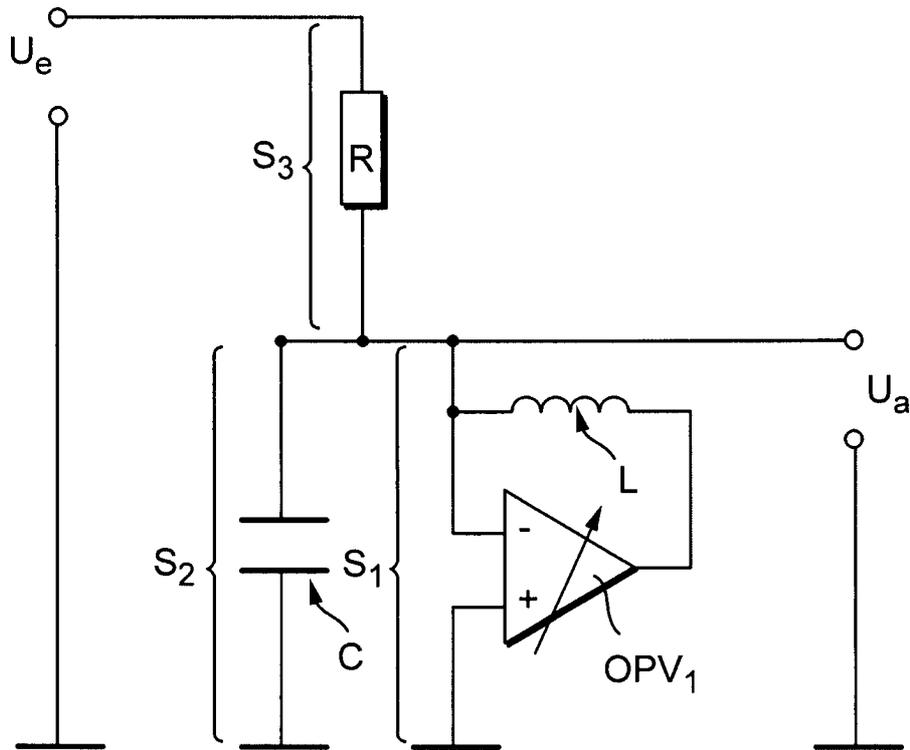


Fig. 2

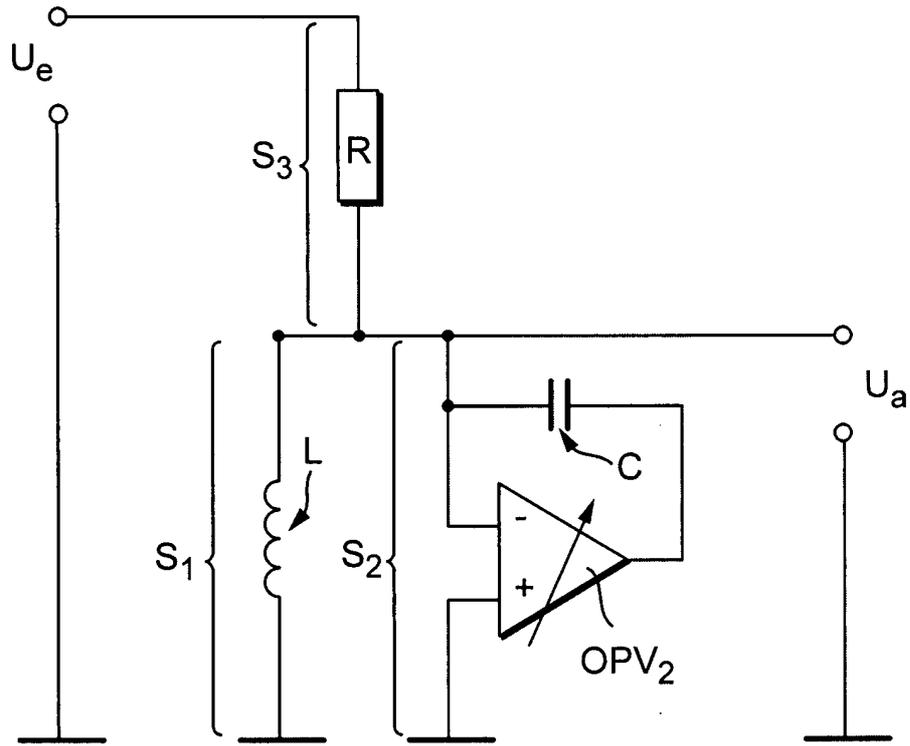


Fig. 3

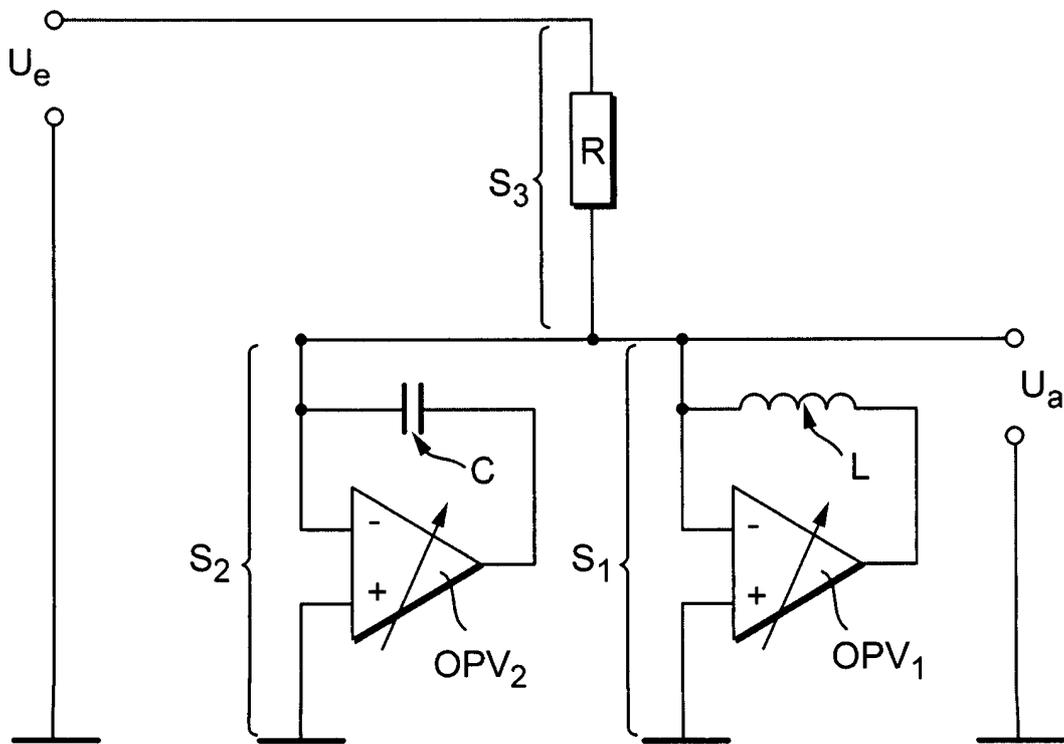


Fig. 4

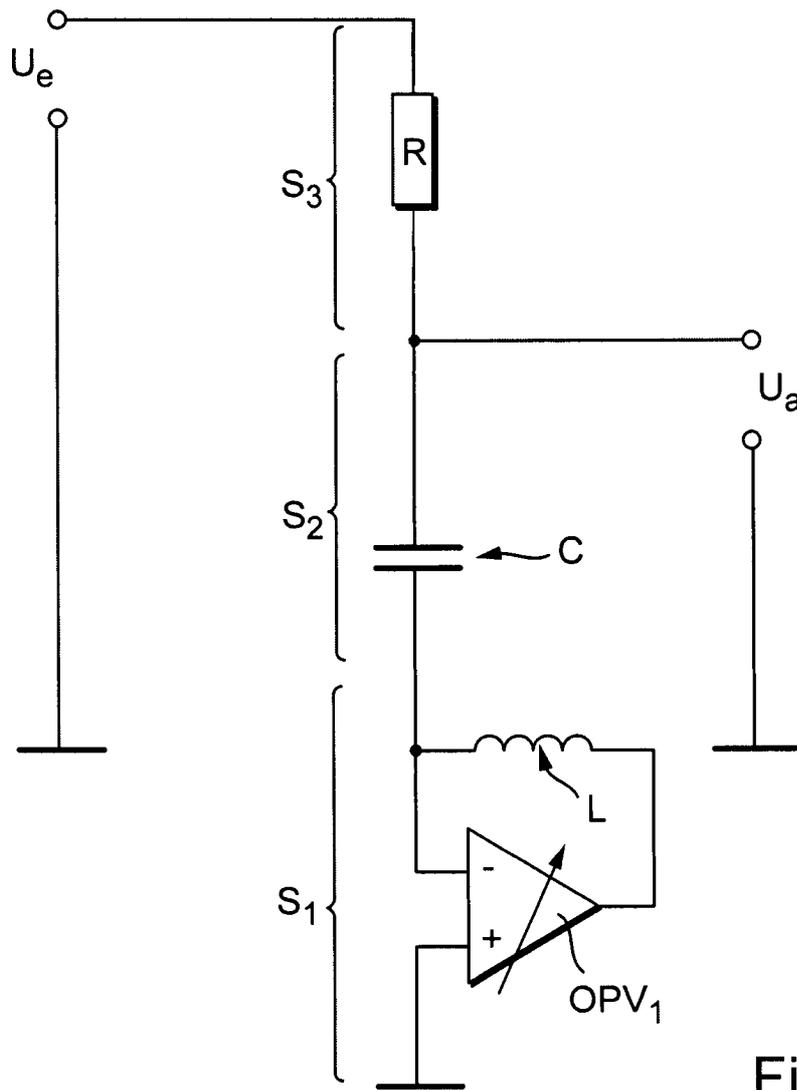


Fig. 5

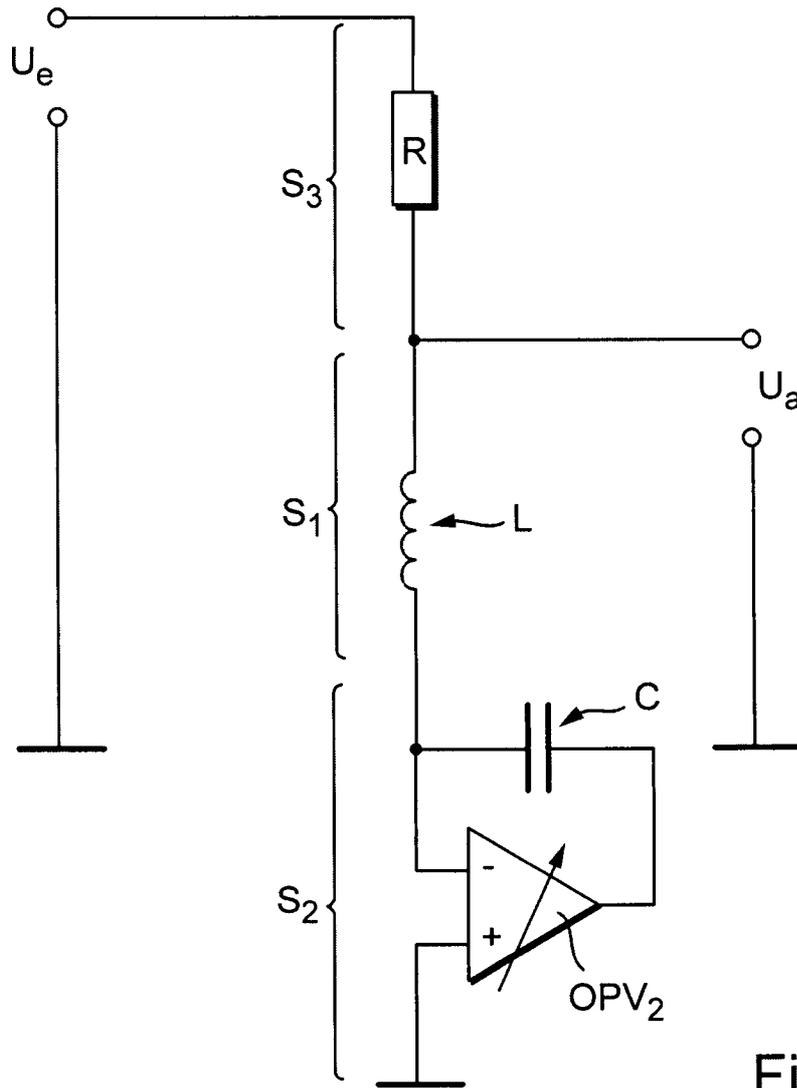


Fig. 6

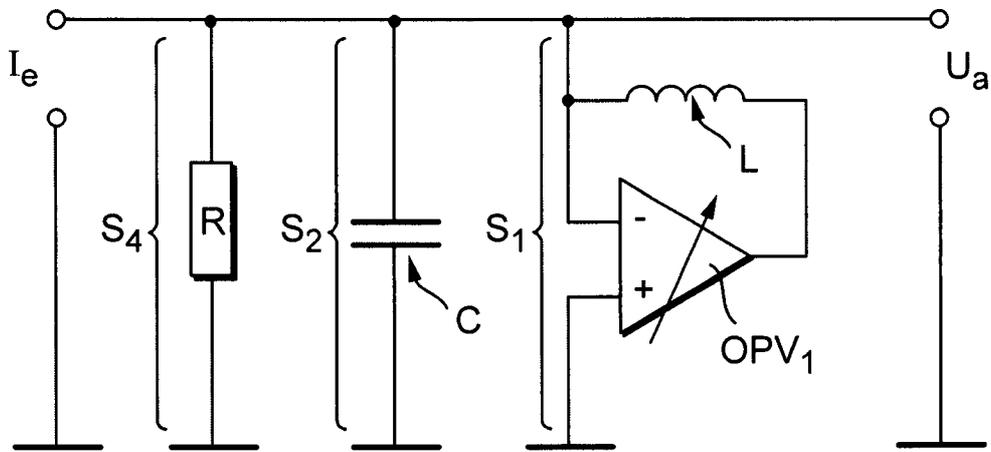


Fig. 7

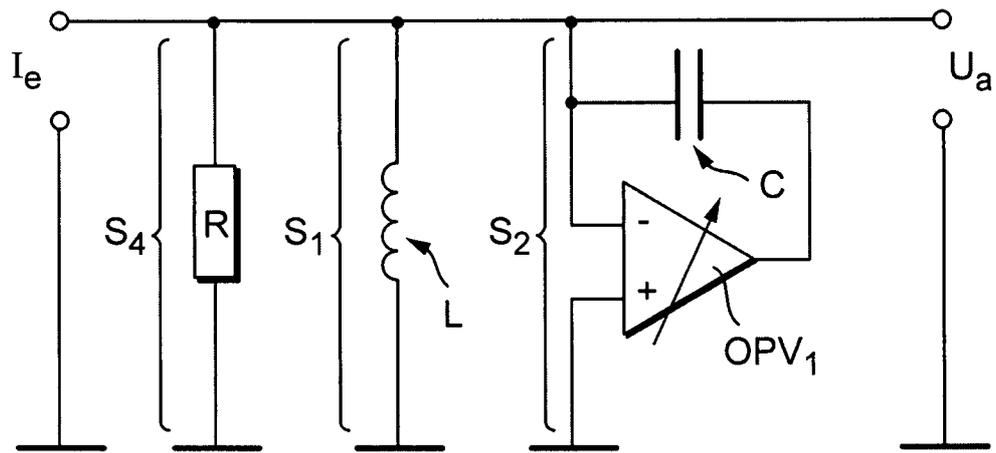


Fig. 8

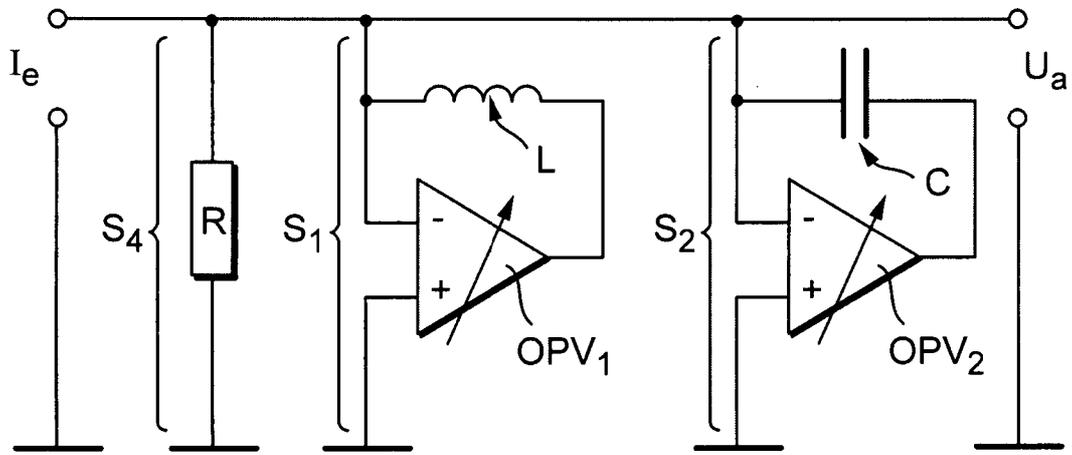


Fig. 9

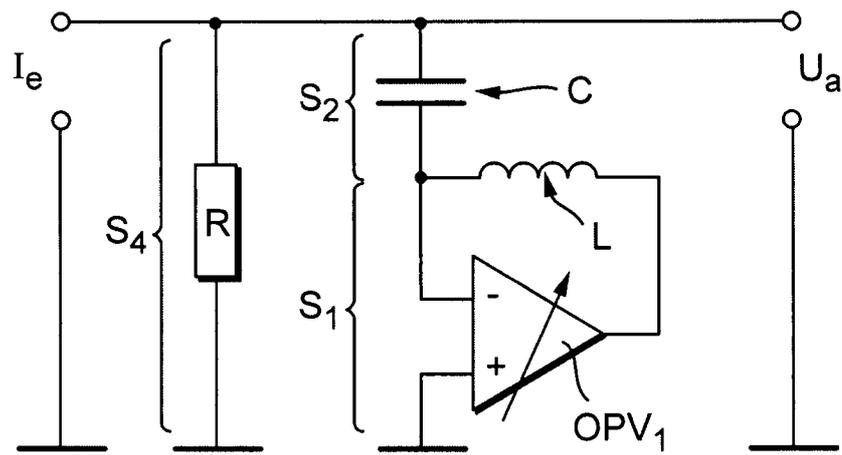


Fig. 10

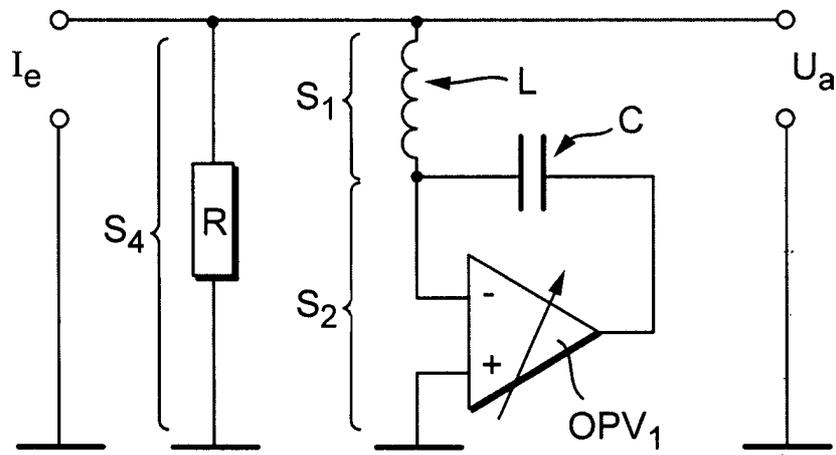


Fig. 11

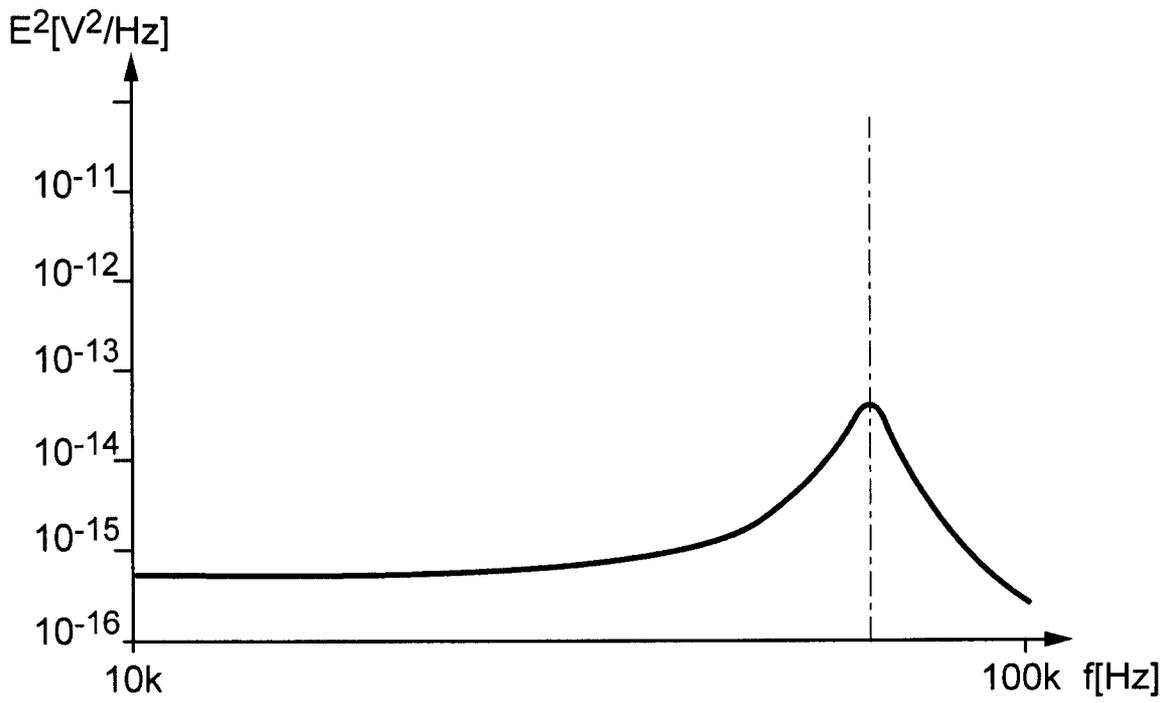


Fig. 12

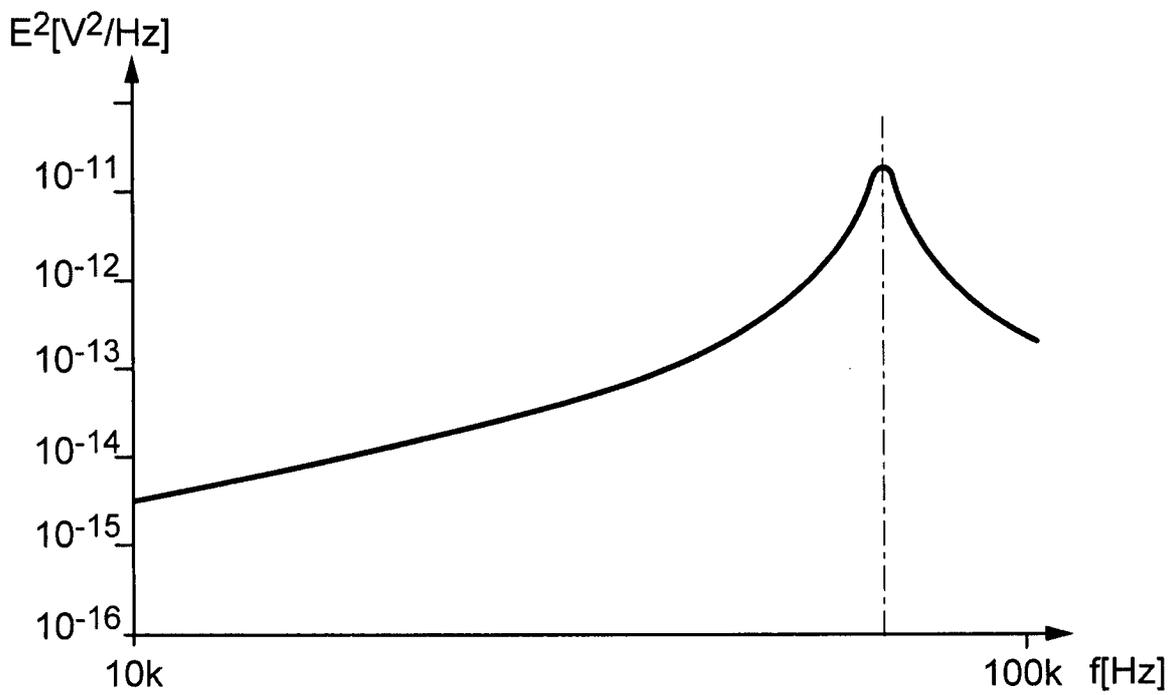


Fig. 13