



(10) **AT 511664 B1 2016-01-15**

(12)

## Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50458/2012 (51) Int. Cl.: **H03F 3/70** (2006.01)  
(22) Anmeldetag: 17.10.2012 **H03F 1/30** (2006.01)  
(45) Veröffentlicht am: 15.01.2016 **H03M 7/30** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:  
WO 2011063536 A1  
DE 3334603 A1  
EP 0253016 A1  
US 6795359 B1  
US 2008165134 A1  
GB 2266203 A

(73) Patentinhaber:  
AVL LIST GMBH  
8020 GRAZ (AT)

(74) Vertreter:  
PATENTANWÄLTE PINTER & WEISS OG  
WIEN

### (54) Digitaler Ladungsverstärker

(57) Herkömmliche analoge und digitale Ladungsverstärker, zur Wandlung einer von einem piezoelektrischen Sensor abgegebenen Ladung in eine proportionale Spannung, benötigen eine analoge Integration, der eine Drift im Ausgangssignal inhärent ist. Um das zu vermeiden, wird ein digitaler Ladungsverstärker (2) vorgeschlagen, bei dem in Abhängigkeit vom Ausgang eines Komparators (5) ein positiver oder negativer konstanter Rückkopplungsstrom ( $i_r$ ) auf den Eingang (3) rückgekoppelt wird und der Eingangsstrom ( $i_e$ ) kompensiert wird, wobei ein Zähler (7) die Zeitdauer, während der ein Rückkopplungsstrom ( $i_r$ ) fließt, erfasst.

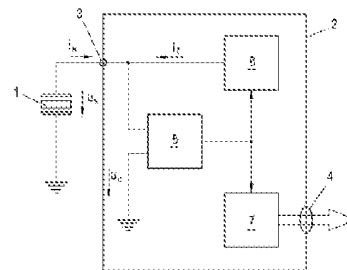


Fig. 1

## Beschreibung

### DIGITALER LADUNGSVERSTÄRKER

**[0001]** Die gegenständliche Erfindung betrifft einen digitalen Ladungsverstärker mit einem analogen Eingang an dem eine Eingangsspannung anliegt und ein Eingangsstrom fließt und mit einem digitalen Ausgang, sowie ein Verfahren zur Digitalisierung eines analogen Signals, das einem Ladungsverstärker an einem analogen Eingang zugeführt wird.

**[0002]** Piezoelektrische Sensoren werden in der Regel mit Ladungsverstärkern betrieben, die die vom piezoelektrischen Sensor abgegebene Ladung in eine proportionale elektrische Spannung wandeln. Als Ladungsverstärker werden häufig Operationsverstärker mit einer kapazitiven Rückkopplung verwendet, die als Integrierer arbeiten. Der Nachteil solcher Ladungsverstärker für einen piezoelektrischen Sensor liegt bekanntermaßen darin, dass die vom Sensor abgegebene Ladung sehr gering sein kann, wodurch der Einsatz von störspannungsarmen Spezialkabeln, die teuer sind, zur Verbindung von Sensor und Ladungsverstärker notwendig wird. Aufgrund der hohen Eingangsimpedanz des Ladungsverstärkers ist der Übertragungsweg auch empfindlich für elektromagnetische Felder, wodurch die Kabellängen auf wenige Meter limitiert sind. Ein weiterer Nachteil solcher Ladungsverstärker ist die der analogen Integration inhärente Drift im Ausgangssignal, beispielsweise aufgrund der Leckageströme am Eingang, was eine Driftkompensation erforderlich macht.

**[0003]** Als Alternative dazu sind Impedanzwandler bekannt, die das hochimpedante Signal des piezoelektrischen Sensors in ein Spannungssignal mit niedriger Impedanz umwandelt, das dann verlustarm über lange Leitungen übertragen werden kann. Der Impedanzwandler ist dabei häufig im Sensor integriert, was jedoch die Einsatzmöglichkeit beschränkt. Z.B. können solche Sensoren mit integrierter Elektronik nicht in Umgebungen mit hohem Druck und/oder Temperatur, wie z.B. als Druckaufnehmer im Zylinder eines Verbrennungsmotors, eingesetzt werden.

**[0004]** Neben den analogen Ladungsverstärkern sind auch digitale Ladungsverstärker bekannt geworden, die den Wert, der vom Sensor abgegebenen Ladung, bzw. einer dazu proportionalen Spannung, digital ausgeben. Dabei bleibt die Eingangsstufe aber nachwievor analog und lediglich das integrierte Eingangssignal wird digitalisiert und als Digitalwert ausgegeben. Die oben angeführten Probleme des analogen Ladungsverstärkers bleiben dabei erhalten.

**[0005]** In der WO 2011/063536 A1 wird ein digitaler Ladungsverstärker gezeigt, bei dem der analoge Eingang des digitalen Ladungsverstärkers an einen herkömmlichen, integrierenden, analogen Ladungsverstärker in Form eines Operationsverstärker mit einer kapazitiven Rückkopplung angeschlossen ist. Der analoge Spannungsausgang des Operationsverstärkers wird an einen Komparator geschaltet und mit einer Referenzspannung verglichen, wodurch die analoge Ausgangsspannung des Operationsverstärkers in einem engen Fenster nahe Null gehalten wird. Diese Schaltung arbeitet als Reset-Schaltung zur Reduzierung der immanenten Drift-Problematik bei solchen Ladungsverstärkern. Vom Komparator werden Stromimpulse erzeugt, die auf den Eingang des Operationsverstärkers rückgekoppelt werden und deren Anzahl in einem Zähler gezählt werden. Der Zählerstand, der proportional zur am analogen Eingang des Ladungsverstärkers ankommenden Ladung ist, repräsentiert dann den digitalen Ausgang des Ladungsverstärkers. Damit wird zwar das Driftproblem bekannter analoger Ladungsverstärker abgeschwächt, die anderen Probleme mit Ladungsverstärkern mit einer analogen Eingangsstufe bleiben dabei aber erhalten.

**[0006]** Bekannt geworden sind auch Ladungsverstärker auf Basis eines Sigma-Delta Analog Digital Wandlers. Ein solcher Wandler geht z.B. aus der WO 2009/062494 A1, der EP 1 345 330 A2 oder der GB 2 292 028 A hervor. Dabei wird der digitale Ausgang des Wandlers über einen Digital-Analog Wandler auf den Eingang rückgekoppelt. Die Differenz zwischen Eingangsstrom und Rückkopplungsstrom wird integriert, quantisiert und mit hoher Abtastrate abgetastet. Der Bitstrom am Ausgang stellt eine digitale Repräsentation der Eingangsspannung dar. Am Ausgang kann auch noch ein digitales Filter vorgesehen sein. Dabei wird aber nachwievor

eine analoge Integration mittels einer Kapazität am Eingang benötigt, weshalb auch damit die damit verbundenen Probleme nicht behoben werden können.

**[0007]** Es ist daher eine Aufgabe der gegenständlichen Erfindung, einen digitalen Ladungsverstärker und ein Verfahren zur Digitalisierung eines analogen Signals anzugeben, die eine Verbesserung hinsichtlich der oben angeführten Nachteile herbeiführt.

**[0008]** Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch erreicht, indem ein Komparator vorgesehen ist, der die Eingangsspannung mit einem Bezugspotential vergleicht und der Ausgang des Komparators eine Rückkopplungsstromquelle ansteuert, wobei die Rückkopplungsstromquelle in Abhängigkeit vom Ausgang des Komparators einen positiven oder negativen konstanten Rückkopplungsstrom erzeugt, der auf den Eingang rückgekoppelt ist und den Eingangsstrom kompensiert, wobei ein Zähler vorgesehen ist, dessen Zählrichtung durch den Ausgang des Komparators bestimmt ist und der Ausgang des Zählers als digitaler Ausgang des digitalen Ladungsverstärkers vorgesehen ist.

**[0009]** Am Eingang des Komparators, bzw. am Eingang des Ladungsverstärkers, wird durch die Rückkopplung eines vom Komparator gesteuerten Rückkopplungsstromes ein virtueller Kurzschluss erzeugt, indem nämlich der Eingangsstrom durch den Rückkopplungsstrom kompensiert wird. Dabei wird die rückgekoppelte Ladungsmenge, die der vom piezoelektrischen Sensor abgegebenen Ladungsmenge entspricht, nicht wie bei herkömmlichen analogen und digitalen Ladungsverstärkern von der Stromstärke eingestellt, sondern durch die Zeitdauer, während der ein negativer oder positiver Referenzstrom rückgekoppelt wird. Die Zeitdauer wird dabei durch den Ausgang des Komparators bestimmt. Auf diese Weise wird erreicht, dass die rückgekoppelte Ladungsmenge proportional einer Zeitdauer ist, die auf einfache Weise mit Hilfe eines Zählers gemessen werden kann. Der Ausgang des Zählers ist somit abhängig vom Eingangsstrom und proportional zu der vom piezoelektrischen Sensor abgegebenen Ladung. Das Zählen entspricht somit der zeitlichen Integration des Eingangsstromes. Das gesuchte Messergebnis steht somit als Zählwert digital zur Verfügung, ohne eine analoge Integration vornehmen zu müssen.

**[0010]** In einer vorteilhaften einfachen Ausgestaltung steuert der Komparator eine Steuerlogik, die wiederum die Rückkopplungsstromquelle ansteuert. Dabei ist ganz besonders einfach, wenn die Steuerlogik Zählimpulse für den Zähler erzeugt.

**[0011]** In einer weiteren vorteilhaften einfachen Umsetzung der Erfindung, wird als Bezugspotential für den Komparator das Bezugspotential des Eingangs, insbesondere Masse, vorgesehen.

**[0012]** Wenn eine Bezugspotentialerzeugungseinheit vorgesehen ist, in der ein Regler implementiert ist, der den zeitlichen Mittelwert des Rückkopplungsstromes, bzw. einer dazu proportionalen Rückkopplungsspannung eliminiert und als Stellgröße das Bezugspotential für den Komparator erzeugt, lassen sich auf einfachem Wege schädliche Auswirkung von Offsetspannung und Biasstrom der Eingangsstufe eliminieren und man erhält so einen praktisch driftfreien Ladungsverstärker.

**[0013]** Wenn als Komparator ein Fensterkomparator verwendet wird, kann in vorteilhafter Weise auch der Ruhezustand, also der Zustand in dem der Sensor keine Ladung abgibt, erfasst werden.

**[0014]** Um den Ladungsverstärker flexibler einsetzbar zu machen, können am Ladungsverstärker ein Empfindlichkeitseingang, über den die Empfindlichkeit der Rückkopplungsstromquelle einstellbar ist, und/oder ein Preset-Eingang, über definierter Ausgangspunkt des Zählers einstellbar ist, vorgesehen sein.

**[0015]** Die digitale Unsicherheit und eventuelle Querempfindlichkeiten zwischen analogem und digitalem Schaltungsteil können reduziert werden, wenn der Rückkopplungsstrom im Takt einer Referenzfrequenzquelle moduliert ist.

**[0016]** Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 5, die schematisch, beispielhaft und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der

Erfindung zeigen, näher erläutert. Dabei zeigt

- [0017] Fig. 1 ein Blockschaltbild des erfindungsgemäßen Ladungsverstärkers,
- [0018] Fig. 2 ein detaillierteres Blockschaltbild des erfindungsgemäßen Ladungsverstärkers,
- [0019] Fig. 3 eine einfache Implementierung des erfindungsgemäßen Ladungsverstärkers,
- [0020] Fig. 4 eine Implementierung des erfindungsgemäßen Ladungsverstärkers mit Fensterkomparator und
- [0021] Fig. 5 eine Implementierung des erfindungsgemäßen Ladungsverstärkers mit moduliertem Rückkopplungsstrom.

[0022] In Fig.1 ist ein erfindungsgemäßer digitaler Ladungsverstärker 2 über einen analogen Eingang 3 mit einem piezoelektrischen Sensor 1 verbunden. An einem digitalen Ausgang 4 des Ladungsverstärkers 2 wird ein digitales Signal ausgegeben, das proportional zur vom piezoelektrischen Sensor 1 abgegebenen Ladung ist. Dazu ist im Ladungsverstärker 2 ein Komparator 5 vorgesehen, der die Eingangsspannung  $u_e$  mit einer Bezugsspannung  $u_0$  vergleicht. Als Bezugsspannung  $u_0$  ist hier z.B. das Massepotential des piezoelektrischen Sensors 1 vorgesehen. Der Ausgang des Komparators 5 steuert einerseits eine Rückkopplungsstromquelle 6 und auch einen Zähler 7 an. Die Rückkopplungsstromquelle 6 erzeugt einen Rückkopplungsstrom  $i_f$ , der den Eingangsstrom  $i_e$  kompensiert und somit einen virtuellen Kurzschluss am Eingang erzeugt. Die Zeitdauer, während der ein positiver oder negativer Rückkopplungsstrom (in Abhängigkeit vom Ausgang des Komparators 5) rückgekoppelt wird, wird durch den Zähler 7 erfasst. Die Zählrichtung des Zählers 7 wird dabei durch das Vorzeichen des Rückkopplungsstromes  $i_f$  bestimmt. Der Zählerstand des Zählers 7 ist damit abhängig vom Rückkopplungsstrom  $i_f$  und damit auch vom Eingangsstrom  $i_e$  und somit proportional zur vom piezoelektrischen Sensor 1 abgegebenen Ladung. Die grundlegende Idee ist dabei folglich, die erforderliche Integration des Eingangsstromes  $i_e$  nicht wie bisher analog mittels einer Kapazität, sondern digital und daher drifffrei mittels eines Zählers 7 durchzuführen.

[0023] Die Funktion des erfindungsgemäßen Ladungsverstärkers 2 wird anhand einer vorteilhaften Ausgestaltung nach Fig.2 nun näher erläutert. Die Eingangsstufe des Ladungsverstärkers 2 wird durch einen Komparator 5 gebildet, der die Eingangsspannung  $u_e$  mit einem Bezugspotential  $u_0$  vergleicht und sein Ergebnis - charakterisiert z.B. durch die Zustände größer, größer-gleich, kleiner, kleiner-gleich - an eine Steuerlogik 10 ausgibt. Der virtuelle Kurzschluss am Eingang, der für die Strom- bzw. Ladungsmessung angestrebt wird, wird hier z.B. dadurch erreicht, dass in der Rückkopplungsstromquelle 6 mit einer Referenzstromerzeugungseinheit 12 aus einer Referenzspannungsquelle 11 ein konstanter Rückkopplungsstrom  $i_f$  erzeugt wird, wie weiter unten noch im Detail beschrieben wird. Dazu kann am Ladungsverstärker 2 auch ein Empfindlichkeitseingang 13 zur Vorgabe bzw. zur Einstellung einer Empfindlichkeit E vorgesehen sein. Die Steuerlogik 10 steuert die Rückkopplungsstromquelle 6 so, dass der Eingangsstrom  $i_e$  gerade kompensiert wird. Dabei wird, im Gegensatz zum konventionellen Ladungsverstärker, der rückgekoppelte Rückkopplungsstrom  $i_f$  (bzw. die rückgekoppelte Ladungsmenge) nicht durch den Momentanwert der Stromstärke eingestellt, sondern durch die Zeitdauer, während der ein negativer oder positiver Rückkopplungsstrom  $i_f$  konstanter und definierter Stromstärke zugeschaltet wird. Die Stromstärke des Rückkopplungsstromes  $i_f$  ist durch die Referenzspannung  $u_R$  und die eingestellte Empfindlichkeit E gegeben. Die Zeitdauer, während der ein Rückkopplungsstrom  $i_f$  erzeugt wird, wird durch die aus dem Ergebnis des Komparators 5 abgeleiteten Steuersignale bestimmt. Auf diese Art wird erreicht, dass die rückgekoppelte Ladungsmenge proportional einer Zeitdauer ist, die auf einfache Art mit Hilfe einer Referenzfrequenz  $f_R$ , die in einer Referenzfrequenzquelle 14 erzeugt wird, und eines Zählers 7 gemessen werden kann. Zu diesem Zweck werden aus dem Taktsignal der Referenzfrequenzquelle 14 und aus den Ergebnissignalen des Komparators 5 Zählpulse erzeugt, die vom Zähler 7 gezählt werden. Der Zähler 7 ist dabei vorteilhaft in der Lage, sowohl aufwärts, als auch abwärts zu zählen. Dieses Zählen entspricht der zeitlichen Integration des Eingangsstromes  $i_e$  und das momentane Zählergebnis ist also proportional zur Ladungsmenge, die vom piezoelektrischen Sensor 1

abgegeben wird. Damit steht der gesuchte Messwert in digitaler Form zur Verfügung und kann als digitaler Wert am digitalen Ausgang 4 des Ladungsverstärkers 2 ausgegeben werden.

**[0024]** Zum Einstellen eines definierten Ausgangspunktes kann am Ladungsverstärker 2 ein Preset-Eingang 15 vorgesehen sein, über den der Zähler 7 rückgesetzt und/oder auf einen bestimmten Zählerstand gesetzt werden kann. Das kann auch als Definition einer Integrationskonstanten gesehen werden und beispielsweise zum Einstellen des digitalen Ausgangssignals auf einen zu bestimmten Zeitpunkten bekannten Messwert des piezoelektrischen Sensors 1 verwendet werden.

**[0025]** Das Bezugspotential  $u_0$  für den Komparator 5 kann in einer Bezugspotentialerzeugungseinheit 16 erzeugt werden. Das Bezugspotential  $u_0$  am Eingang des Komparators 5 kann, wie bereits oben erwähnt, im einfachsten Fall das Bezugspotential der Eingangsleitung bzw. des piezoelektrischen Sensors 1, also z.B. Masse, sein. Es besteht aber auch die Möglichkeit, über eine Regelung von  $u_0$  die schädliche Auswirkung von Offsetspannung und Biasstrom der Eingangsstufe zu eliminieren. Man erhält so einen praktisch driftfreien Ladungsverstärker 2. Zum Erzeugen des Bezugspotentials  $u_0$  kann dabei zweckmäßigerweise ein Integralregler verwendet, der auch Proportionalanteile aufweisen kann. Der Regler hat die Aufgabe, den zeitlichen Mittelwert des Rückkopplungsstromes  $i_f$ , bzw. einer dazu proportionalen Rückkopplungsspannung  $u_f$ , verschwinden zu lassen. Zu diesem Zweck vergleicht er den Istwert der Rückkopplungsspannung  $u_f$  mit einem Sollwert, der z.B. durch das Bezugspotential der Eingangsleitung bzw. des piezoelektrischen Sensor 1 gegeben ist. Aus der festgestellten Abweichung erzeugt er gemäß seiner Regelcharakteristik als Stellgröße das Bezugspotential  $u_0$  für den Komparator.

**[0026]** Eine sehr einfache Implementierung des erfindungsgemäßen Ladungsverstärkers 1 ist in Fig.3 dargestellt. Der Komparator 5 liefert hier nur zwei Zustände, nämlich größer-gleich oder kleiner-gleich, die die Zählrichtung des Zählers 7 vorgeben. Die Steuerlogik 10 ist ein einfacher Schalter, dessen Stellung über einen einfachen Differenzverstärker einen positiven oder negativen Rückkopplungsstrom  $i_f$  bewirkt. Der Ruhezustand wird hierbei vom Komparator 5 nicht detektiert, weshalb im Ruhezustand ständig zwischen positiven und negativen Rückkopplungsstrom  $i_f$  hin- und hergeschaltet wird. Das Bezugspotential  $u_0$  wird hier in Abhängigkeit von der Rückkopplungsspannung  $u_f$  über einen IP-Regler, in Form eines Integrierers mit Proportionalanteil, eingestellt.

**[0027]** Fig.4 zeigt einen erfindungsgemäßen Ladungsverstärker 2 mit Fensterkomparator 20 und optionalem Vorverstärker 21 als Komparator 5. Damit kann auch der Ruhezustand detektiert werden, in dem kein Rückkopplungsstrom  $i_f$  erzeugt wird und in dem auch keine Zählpulse für den Zähler 7 erzeugt werden. Je nach Ausgang des Komparators 5 zählt der Zähler 7 aufwärts oder abwärts oder gar nicht.

**[0028]** In der Ausgestaltung nach Fig.5 ist der negative und positive Rückkopplungsstrom  $i_f$  im Takt der Referenzfrequenz  $f_R$  moduliert, hier pulsweitenmoduliert (PWM). Gleichzeitig wird durch die dargestellte Schaltung sichergestellt, dass die Referenzspannung  $u_R$  und damit auch der Rückkopplungsstrom  $i_f$  symmetrisch sind, also im zeitlichen Mittel Null sind. Dadurch können gegenüber den Schaltungen nach Fig.3 oder 4 die digitale Unsicherheit und eventuelle Querempfindlichkeiten zwischen analogem und digitalem Schaltungsteil reduziert werden.

**[0029]** Einzelne oder alle Komponenten des erfindungsgemäßen digitalen Ladungsverstärkers 2, z.B. der Zähler oder die Driftregelung, die in den Figuren 1 bis 5 anhand von Hardware beschrieben werden, können natürlich auch als Software realisiert werden, z.B. auf einem Mikroprozessor, einem Digitalen Signalprozessor (DSP) oder einem speicherprogrammierbaren Bauteil.

## Patentansprüche

1. Digitaler Ladungsverstärker (2) dem an einem analogen Eingang (2) durch einen piezoelektrischen Sensor (1) eine Eingangsspannung ( $u_e$ ) zur Verfügung gestellt wird und an dessen analogem Eingang (2) ein Eingangsstrom ( $i_e$ ) fließt, wobei der digitale Ladungsverstärker (2) einen digitalen Ausgang (4) aufweist, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein Komparator (5) vorgesehen ist, der die Eingangsspannung ( $u_e$ ) mit einem Bezugspotential ( $u_0$ ) vergleicht, **dass** der Ausgang des Komparators (5) eine Rückkopplungsstromquelle (6) ansteuert, wobei die Rückkopplungsstromquelle (6) in Abhängigkeit vom Ausgang des Komparators (5) einen positiven oder negativen konstanten Rückkopplungsstrom ( $i_r$ ) erzeugt, der auf den Eingang (3) rückgekoppelt ist und der den Eingangsstrom ( $i_e$ ) kompensiert **und dass** ein Zähler (7) vorgesehen ist, dessen Zählrichtung durch den Ausgang des Komparators (5) bestimmt ist und der Ausgang des Zählers (7) als digitaler Ausgang (4) des digitalen Ladungsverstärkers (2) vorgesehen ist.
2. Digitaler Ladungsverstärker nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Komparator (5) eine Steuerlogik (10) ansteuert, die die Rückkopplungsstromquelle (6) ansteuert.
3. Digitaler Ladungsverstärker nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuerlogik (10) Zählimpulse für den Zähler (7) erzeugt.
4. Digitaler Ladungsverstärker nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Bezugspotential ( $u_0$ ) für den Komparator (5) das Bezugspotential des Eingangs, insbesondere Masse, vorgesehen ist.
5. Digitaler Ladungsverstärker nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Bezugspotentialerzeugungseinheit (16) vorgesehen ist, in der ein Regler implementiert ist, der den zeitlichen Mittelwert des Rückkopplungsstromes ( $i_r$ ), bzw. einer dazu proportionalen Rückkopplungsspannung ( $u_r$ ), eliminiert und als Stellgröße das Bezugspotential ( $u_0$ ) für den Komparator (5) erzeugt.
6. Digitaler Ladungsverstärker nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Komparator (5) ein Fensterkomparator vorgesehen ist.
7. Digitaler Ladungsverstärker nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** am Ladungsverstärker (2) ein Empfindlichkeitseingang (13) vorgesehen ist, über den die Empfindlichkeit (E) der Rückkopplungsstromquelle (6) einstellbar ist.
8. Digitaler Ladungsverstärker nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** am Ladungsverstärker (2) ein Preset-Eingang (15) vorgesehen ist, über den ein definierter Ausgangspunkt des Zählers (7) einstellbar ist.
9. Digitaler Ladungsverstärker nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Rückkopplungsstrom ( $i_e$ ) im Takt einer Referenzfrequenzquelle (14) moduliert ist.
10. Verfahren zur Digitalisierung eines analogen Signals, das von einem piezoelektrischen Sensor (1) einem Ladungsverstärker (2) an einem analogen Eingang (3) zugeführt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** die analoge Eingangsspannung ( $u_e$ ) in einem Komparator (5) mit einem Bezugspotential ( $u_0$ ) verglichen wird, **dass** mit dem Ausgang des Komparators (2) eine Rückkopplungsstromquelle (6) angesteuert wird, die in Abhängigkeit vom Ausgang des Komparators (5) einen positiven oder negativen konstanten Rückkopplungsstrom ( $i_r$ ) erzeugt, der auf den Eingang (3) rückgekoppelt wird und den Eingangsstrom ( $i_e$ ) kompensiert, **und dass** die Zeitdauer, während der ein positiver oder negativer Rückkopplungsstrom ( $i_r$ ) in Abhängigkeit vom Ausgang des Komparators (5) rückgekoppelt wird, durch einen Zähler (7), dessen Zählrichtung durch das Vorzeichen des Rückkopplungsstromes ( $i_r$ ) bestimmt ist, erfasst wird, wobei der Ausgang des Zählers (7) als digitaler Ausgang (4) des digitalen Ladungsverstärkers (2) verwendet wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Rückkopplungsstrom ( $i_f$ ) im Takt einer Referenzfrequenzquelle (14) moduliert wird.

**Hierzu 5 Blatt Zeichnungen**

1/5

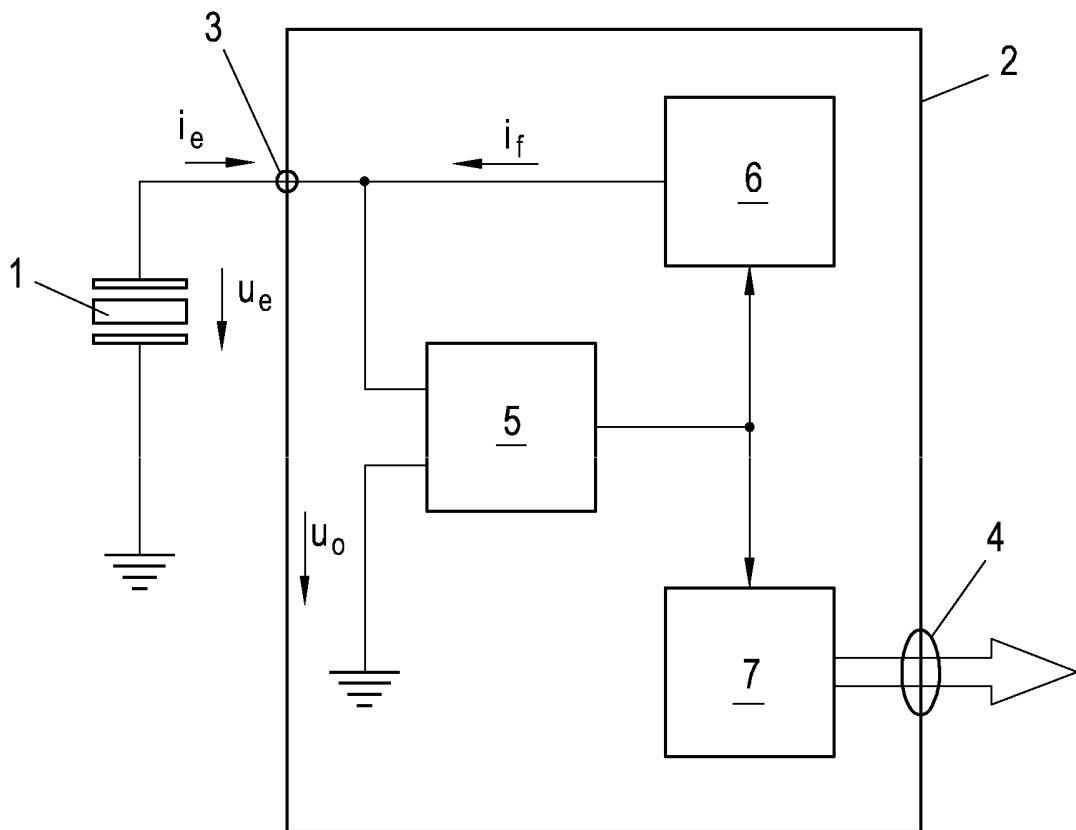


Fig. 1

2/5

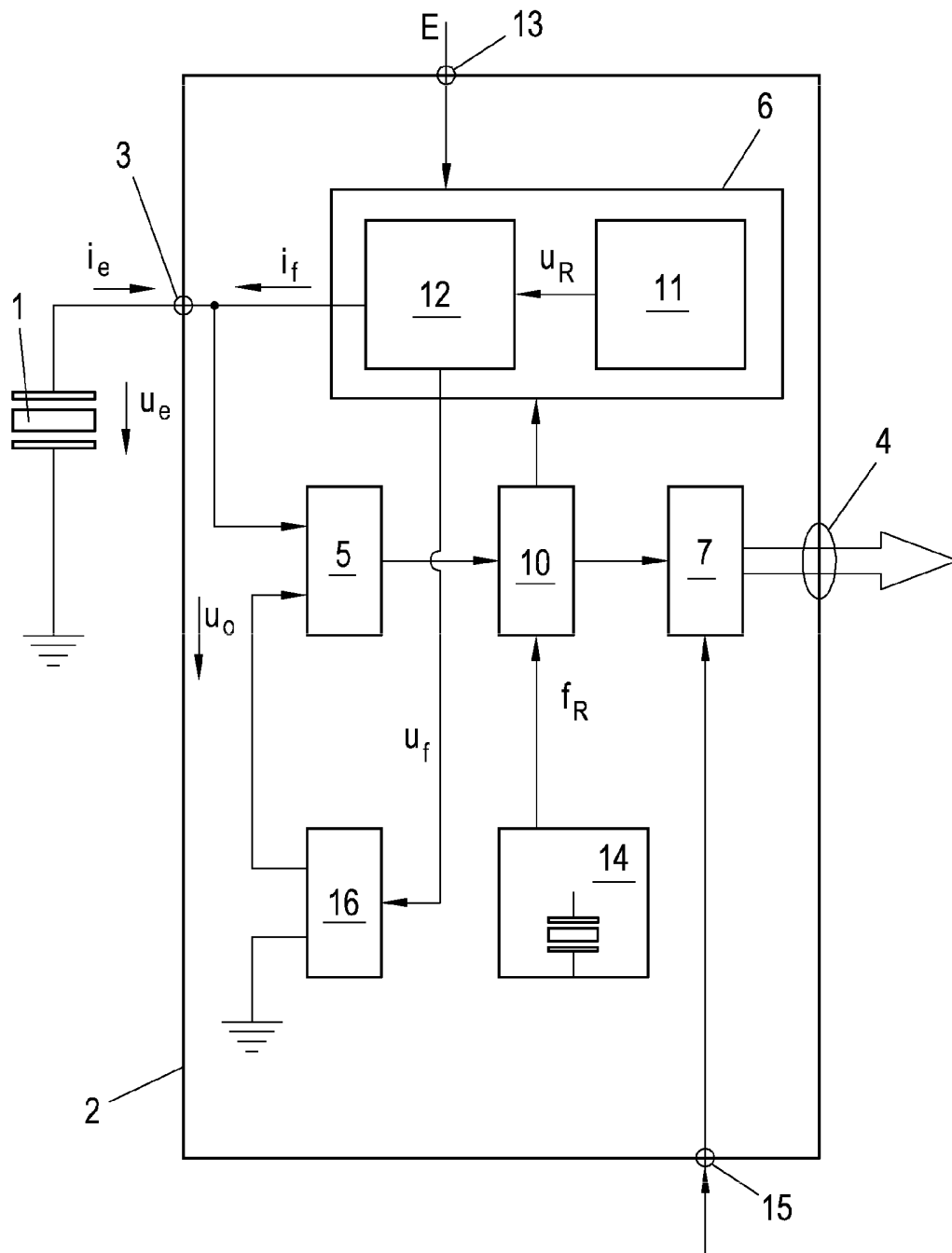


Fig. 2

3/5

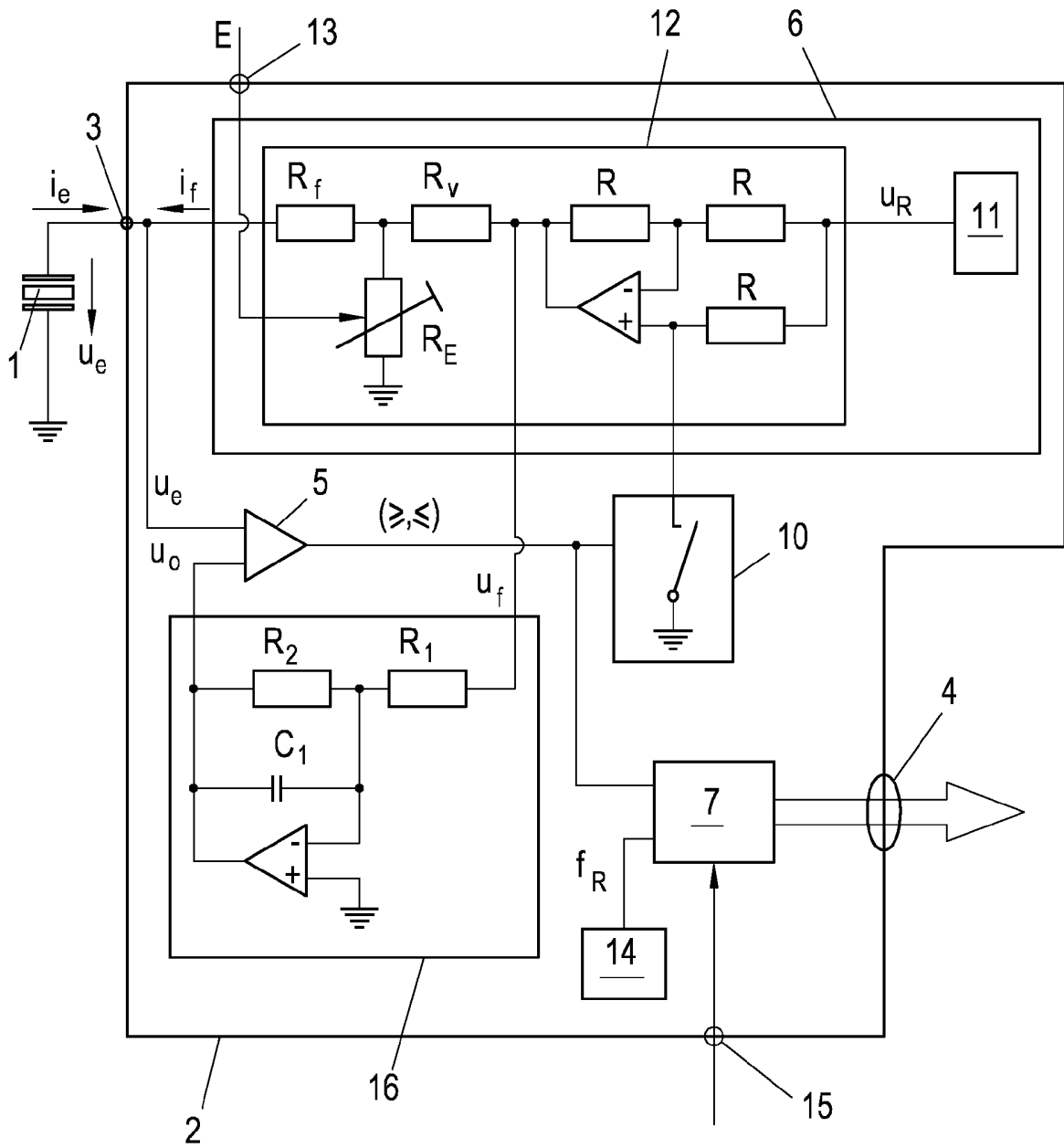


Fig. 3

4/5

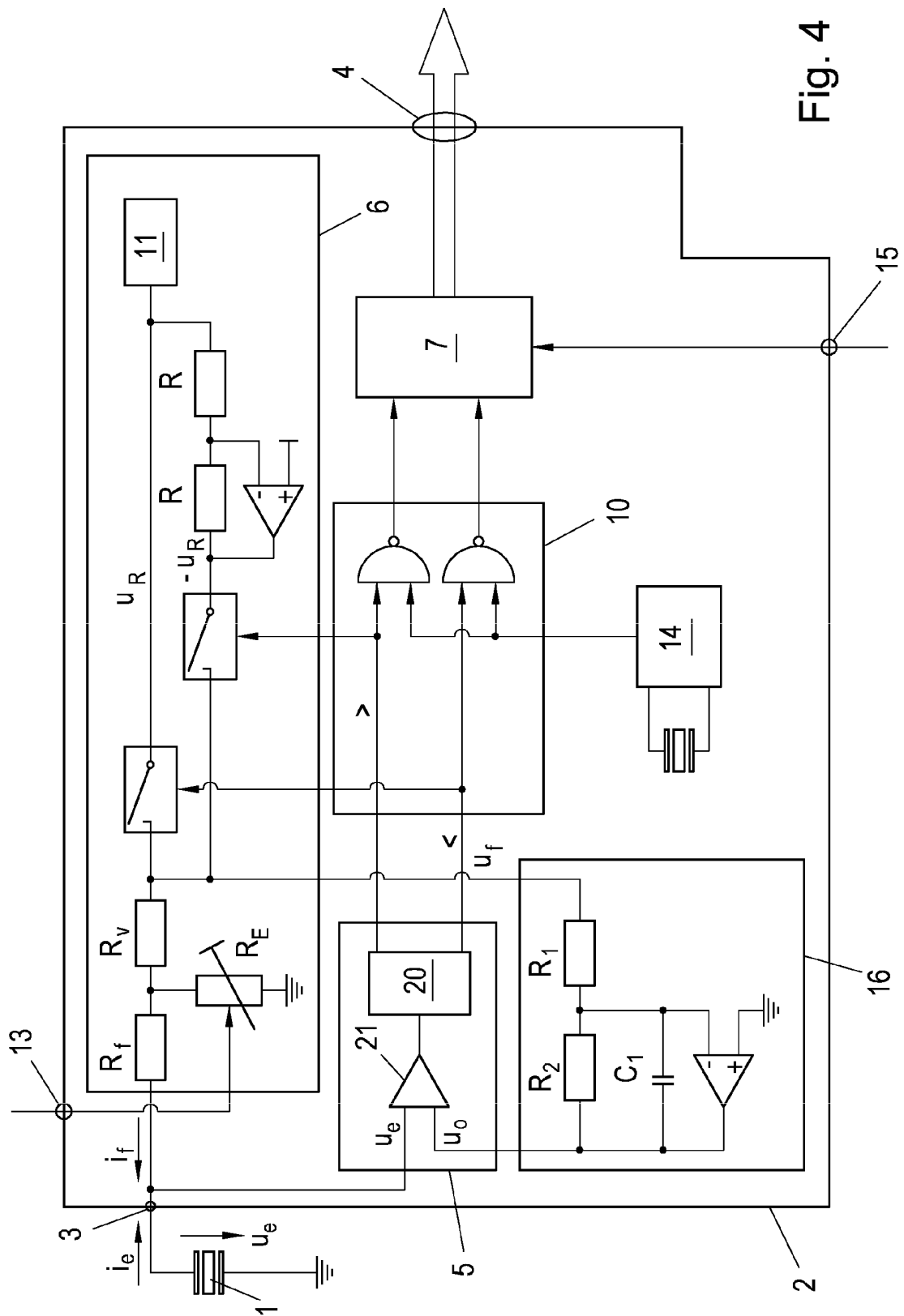


Fig. 4

5/5

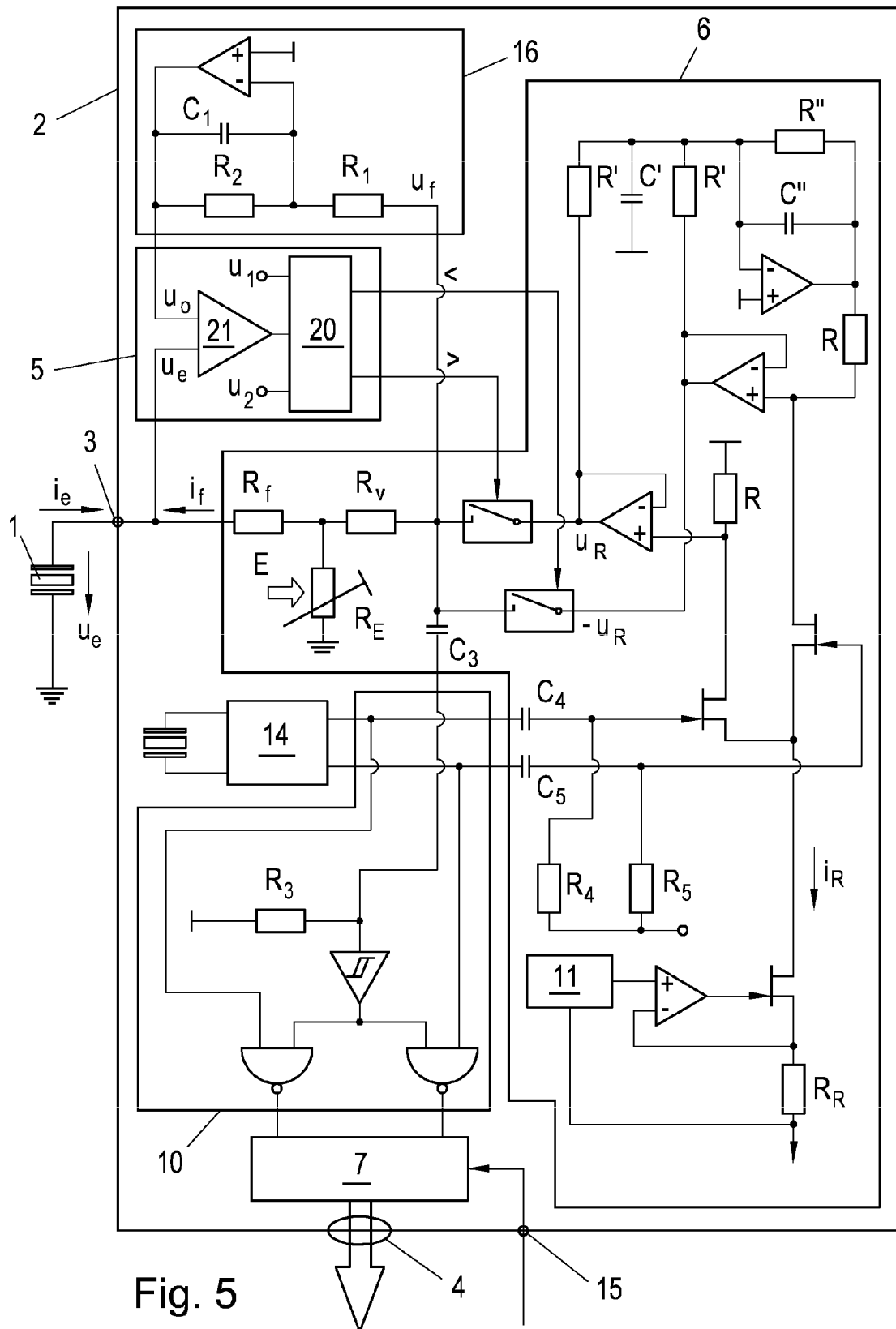


Fig. 5