

**Veröffentlicht:**

- *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur elektrischen Erregung eines piezoelektrischen Aktors eines Ultraschallmotors mit einer mechanischen Resonanzfrequenz F_m , wobei der Ultraschallmotor wenigstens einen akustischen Stehwellengenerator aufweist, der eine Erregerelektrode und eine allgemeine Elektrode umfasst, wobei sich zwischen der Erregerelektrode und der allgemeinen Elektrode eine elektrische Kapazität C_o ausbildet. Erfindungsgemäß umfasst das Verfahren folgende Schritte: Anlegen einer rechteckigen Erregerspannung U_g an die Erregerelektrode und die allgemeine Elektrode des wenigstens einen akustischen Stehwellengenerators, wobei sich die Frequenz der rechteckigen Erregerspannung U_g von der mechanischen Resonanzfrequenz F_m des Aktors unterscheidet; Bereitstellung einer elektrischen Spannung u_g mit Hilfe eines Rückkopplungselements, wobei die elektrische Spannung u_g proportional zu einem durch den Stehwellengenerator fließenden Strom I_g ist, der einen Summenstrom aus einem piezoelektrischen Strom I_p sowie einem Lade- und Entladestrom I_c der elektrischen Kapazität C_o darstellt; - Separierung einer elektrischen Spannung u_p von einer elektrischen Spannung u_c mit Hilfe eines Impulsfilters, wobei die elektrische Spannung u_p proportional zum piezoelektrischen Strom I_p und die elektrische Spannung u_c proportional zum Lade- und Entladestrom I_c der elektrischen Kapazität C_o ist; und Ändern der Frequenz der rechteckigen Erregerspannung dergestalt, dass die Phasenverschiebung zwischen dem piezoelektrischen Strom I_p und der rechteckigen Erregerspannung U_g im Wesentlichen Null wird. Zudem betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur elektrischen Erregung eines piezoelektrischen Aktors eines Ultraschallmotors.

Beschreibung

- [0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur elektrischen Erregung eines Aktors für einen Ultraschallmotor.
- [0002] Aus den Patentschriften US 5,214,339, US 5,461,273 und US 5,479,063 sind beispielsweise ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Erregung des Aktors eines Ultraschallwellenmotors bekannt. Hier wird jeweils beschrieben, dass die Frequenz der elektrischen Spannung des erregten Ultraschallaktors durch Aufrechterhaltung eines konstanten Phasenunterschieds zwischen der Erreger-Spannung und der Spannung geregelt wird, die durch die auf dem Piezoelements des Ultraschallaktors angeordneten Hilfselektrode generiert wird.
- [0003] Der Nachteil dieses Verfahrens und der entsprechenden Erregervorrichtung besteht darin, dass der Phasenunterschied zwischen elektrischer Erregerspannung des Aktors und der Spannung der Hilfselektrode von der mechanischen Last am Aktor abhängt. Deshalb ist im Fall des Einwirkens hoher mechanischer Lasten auf den Ultraschallaktor bei diesen Motoren die Frequenz der elektrischen Erregerspannung nicht gleich der mechanischen Resonanzfrequenz des Ultraschallaktors. Das wirkt sich destabilisierend auf die Funktion des Ultraschallmotors aus. Außerdem muss die Hilfselektrode für einen sicheren Betrieb eine große Fläche haben, was wiederum die Fläche für die Erregerelektroden verringert und eine Erhöhung der Erregerspannung nach sich zieht. Ferner muss die Hilfselektrode über einen zusätzlichen Ausgang in Form eines dünnen Drahtes verfügen. Bei hohen Bewegungsgeschwindigkeiten des beweglichen Elementes vermindert dies die Betriebssicherheit der Motoren.
- [0004] Weiterhin sind beispielsweise aus der Patentschrift US 5,872,418 ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Erregung eines Ultraschallmotors bekannt, wobei die Frequenz der elektrischen Erregerspannung des Ultraschallaktors dadurch geregelt wird, dass ein konstanter Phasenunterschied zwischen der den Aktor erregenden Spannung und dem durch diesen fließenden Strom aufrecht erhalten wird. Bei diesem Verfahren und der entsprechenden Vorrichtung wird an das Piezoelement des Ultraschallaktors eine sinusförmige elektrische Spannung angelegt, die den Ultraschallaktor anregt. Die angelegte Sinusspannung bewirkt, dass durch das Piezoelement ein sinusförmiger Strom fließt.
- [0005] Der Nachteil dieses Verfahren besteht ebenso darin, dass der Phasenunterschied zwischen der elektrischen Erregerspannung und dem durch das Piezoelement fließenden Strom von der mechanischen Last am Ultraschallaktor abhängt. Das ist dadurch bedingt, dass der durch das Piezoelement fließende sinusförmige Strom zwei Bestandteile aufweist, nämlich einen kapazitiven Strom, der durch die elektrische Kapazität des Piezoelements fließt, und einen piezoelektrischen Strom, der durch den

Drehwinkel der Domänen des Piezoelementes bestimmt ist. Bei der mechanischen Resonanzfrequenz stellt der piezoelektrische Strom einen so genannten aktiven Strom oder Wirkstrom dar. Bei einer kleinen mechanischen Last am Ultraschallaktor ist der aktive Widerstand des Aktors bedeutend kleiner als sein reaktiver Widerstand. Deshalb ist die Phasenverschiebung zwischen der Erregerspannung und dem durch das Piezoelement fließenden Strom bei der mechanischen Resonanzfrequenz klein und nähert sich Null. Bei einer Erhöhung der am Aktor anliegenden mechanischen Last erhöht sich der aktive Widerstand, während der reaktive Widerstand konstant bleibt. Deshalb bewirkt die Erhöhung der mechanischen Last eine Vergrößerung des Verschiebungswinkels zwischen der Erregerspannung und dem durch das Piezoelement des Ultraschallaktors fließenden Strom.

- [0006] In Ultraschallmotoren mit einem guten Friktionskontakt zwischen dem Ultraschallaktor und einem durch den Ultraschallaktor anzutreibenden Element kann sich bei einer Erhöhung der mechanischen Last der Phasenverschiebungswinkel von einigen Grad um das Zehnfache und mehr erhöhen. Die Schwingungen der Phasenverschiebung werden dabei nicht nur durch eine mechanische Last am anzutreibenden Element verursacht, sondern auch durch eine Welligkeit der Friktionsoberfläche sowie durch eine mechanische Unwucht des anzutreibenden Elementes.
- [0007] Bei Motoren, bei denen die Frequenz der sinusförmigen elektrischen Erregerspannung des Ultraschallaktors dadurch geregelt wird, dass ein konstanter Phasenunterschied zwischen der Phase dieser Spannung und der Phase des sinusförmigen Stromes des Piezoelementes aufrechterhalten wird, kommt es zu einer Destabilisierung der Funktion des Ultraschallmotors.
- [0008] Diese Destabilisierung hat zur Folge, dass sich die Erregerspannung erhöht und der erforderliche Strom und die Leistung ansteigen. Außerdem treten Geschwindigkeitsschwingungen des anzutreibenden Elementes auf. Die vom Motor erzeugbare maximale Kraft verringert sich. Diese Kraft hängt von der Lage des anzutreibenden Elementes ab. Beim Anliegen einer großen Last kann dadurch der Motor zum Stillstand kommen und sich der Aktor erhitzen. Durch besagte Erhitzung engt sich der Temperatureinsatzbereich für den Ultraschallmotor ein.
- [0009] Daher ist es Ziel der Erfindung, ein Verfahren zur Erregung des Aktors eines Ultraschallmotors und eine entsprechende Erregervorrichtung bereitzustellen, durch das bzw. die es gelingt, die Betriebsstabilität des Motors beim Anliegen hoher mechanischer Lasten am Aktor zu erhöhen, die erforderliche Erregerspannung abzusenken, den Strombedarf und die elektrische Leistung zu verringern und den Temperatureinsatzbereich zu erweitern.
- [0010] Die zuvor genannten Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren zur elektrischen Erregung eines Aktors für einen Ultraschallmotor mit den Merkmalen des Anspruchs 1

sowie einer Vorrichtung zur elektrischen Erregung eines Aktors für einen Ultraschallmotor mit den Merkmalen des Anspruchs 3. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den abhängigen Patentansprüchen.

- [0011] Grundlegende Idee der Erfindung ist es, den durch den Aktor fließenden piezoelektrischen Strom vom kapazitiven Ladestrom des Aktors zu trennen und die Phasenverschiebung des separierten piezoelektrischen Stromes für die Regelung der Frequenz der Erregerspannung des Ultraschallaktors zu verwenden.
- [0012] Im Folgenden werden die Begriffe ‚Aktor für einen Ultraschallmotor‘, ‚Ultraschallaktor‘ oder auch nur ‚Aktor‘ synonym verwendet.
- [0013] Die Erfindung schafft ein Verfahren zur elektrischen Erregung eines Aktors für einen Ultraschallmotor mit einer mechanischen Resonanzfrequenz F_m , wobei der Ultraschallmotor wenigstens einen akustischen Stehwellengenerator aufweist, der eine Erregerelektrode und eine allgemeine Elektrode umfasst, wobei sich zwischen der Erregerelektrode und der allgemeinen Elektrode eine elektrische Kapazität C_o ausbildet. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren erfolgt in einem ersten Schritt das Anlegen einer rechteckigen Erregerspannung U_g an die Erregerelektrode und die allgemeine Elektrode des wenigstens einen akustischen Stehwellengenerators, wobei sich die Frequenz der rechteckigen Erregerspannung von der mechanischen Resonanzfrequenz F_m des Aktors unterscheidet. Sodann wird mit Hilfe eines Rückkopplungselements eine elektrische Spannung u_g bereitgestellt, wobei die elektrische Spannung u_g proportional zu einem durch den Stehwellengenerator fließenden Strom I_g ist, und der Strom I_g ein Summenstrom aus einem piezoelektrischen Strom I_p sowie einem Lade- und Entladestrom I_c der elektrischen Kapazität C_o ist. Darauf folgt der Schritt der Separierung einer elektrischen Spannung u_p aus der elektrischen Spannung u_c mit Hilfe eines Impulsfilters, wobei die elektrische Spannung u_p proportional zum piezoelektrischen Strom I_p und die elektrische Spannung u_c proportional zum Lade- und Entladestrom I_c der elektrischen Kapazität C_o ist. Schließlich wird die Frequenz der rechteckigen Erregerspannung so geändert, dass die Phasenverschiebung zwischen dem piezoelektrischen Strom I_p und der rechteckigen Erregerspannung U_g im Wesentlichen Null wird.
- [0014] Eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur elektrischen Erregung eines piezoelektrischen Aktors eines Ultraschallmotors, wobei der Aktor wenigstens einen akustischen Stehwellengenerator aufweist, umfasst wenigstens einen Leistungsverstärker, ein Rückkopplungselement, ein Filter und eine Steuerspannungsformierungseinrichtung. Hierbei ist der wenigstens eine Leistungsverstärker als Spannungsumschalter für eine Versorgungsspannung des Aktors ausgeführt, wobei der Spannungsumschalter mit dem wenigstens einen akustischen Stehwellengenerator direkt oder indirekt verbunden ist. Weiterhin ist das Rückkopplungselement in Reihe mit dem akustischen Stehwell-

lengenerator geschaltet, so dass durch dieses der gleiche Strom wie durch den Stehwellengenerator fließt, und das Filter ist als Impulsfilter der elektrischen Spannung, die durch das Rückkopplungselement erzeugt wird, ausgeführt. Zudem ist ein Ausgang des Filters mit einem Eingang der Steuerspannungsformierungseinrichtung und die Steuerspannungsformierungseinrichtung mit einem Eingang des wenigstens einen Leistungsverstärker verbunden.

- [0015] Das erfindungsgemäße Verfahren bzw. die erfindungsgemäße Vorrichtung ermöglichen es, die optimale Frequenz der Erregerspannung für den Ultraschallaktor zu halten. Diese Frequenz wird unabhängig von der auf den Aktor des Ultraschallmotors einwirkenden Lasten andauernd gleich der mechanischen Resonanzfrequenz des Aktors gehalten, wodurch sich die Betriebsstabilität des Ultraschallmotors erhöht. Der Ultraschallmotor arbeitet so stets in einem optimalen Betriebsregime. Dadurch verringert sich die Höhe der Erregerspannung, der erforderliche Strom und die erforderliche Leistung werden reduziert und der Motor erhitzt sich weniger stark.
- [0016] Gemäß einer zweckmäßigen Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der durch den Stehwellengenerator fließende piezoelektrische Strom I_p zusätzlich stabilisiert. Dadurch kann die Schwingungsgeschwindigkeit der im Aktor erzeugten Welle und damit auch die Bewegungsgeschwindigkeit des anzutreibenden Elements zusätzlich stabilisiert werden.
- [0017] Gemäß einer zweckmäßigen Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist der Spannungsumschalter als Halbbrückenleistungsverstärker oder als Brückenleistungsverstärker oder als Zweitaktleistungsverstärker ausgeführt. Hierdurch ist es möglich, den inneren Widerstand des Spannungsumschalters deutlich zu verringern und damit die Impulsdauer des kapazitiven Lade- und Entladestroms I_c maximal zu verkürzen.
- [0018] Es kann vorteilhaft sein, dass das Rückkopplungselement einen niedrigohmigen Wirkwiderstand oder einen Messtransformator für einen elektrischen Strom umfasst. Hierdurch kann der Phasenfehler bei der Wandlung des Stroms I_g in die Spannung u_g deutlich reduziert werden.
- [0019] Weiterhin kann es von Vorteil sein, dass das Impulsfilter als ein auf die mechanische Resonanzfrequenz F_m des Aktors abgestimmtes Bandfilter für die vom Rückkopplungselement generierte Spannung ausgeführt ist. Die Ausführung des Impulsfilters 23 als Bandfilter 33 ermöglicht es, den Phasenfehler bei der mechanischen Resonanzfrequenz F_m zu eliminieren.
- [0020] Es kann sich als günstig erweisen, dass das Impulsfilter als Tiefpassfilter oder als Integrator für die durch das Rückkopplungselement erzeugte Spannung ausgeführt ist. Dadurch gelingt ein äußerst einfacher Aufbau des Impulsfilters.
- [0021] Zudem kann es sich als günstig erweisen, dass das Impulsfilter einen Ausschalter für

die vom Rückkopplungselement erzeugte Spannung umfasst, und ein Steuereingang des Ausschalters über einen Flankendetektor mit dem Spannungsumschalter verbunden ist.

[0022] Weiterhin kann es sich als günstig erweisen, dass das Impulsfilter als Spannungskomparator ausgeführt ist.

[0023] Außerdem kann es sich als günstig erweisen, dass die Vorrichtung zur elektrischen Erregung eines piezoelektrischen Aktors eines Ultraschallmotors als Autogenerator ausgeführt ist.

[0024] Es kann von Vorteil sein, dass die Steuerspannungsformierungseinrichtung einen Phasendetektor und einen gesteuerten Generator für eine Rechteckspannung umfasst.

[0025] Es kann ebenso von Vorteil sein, dass die Steuerspannungsformierungseinrichtung einen symmetrischen PWM-Modulator aufweist. Durch Verwendung eines symmetrischen PWM-Modulators ist es möglich, den Strom I_p und damit die Bewegungsgeschwindigkeit des anzutreibenden Elements zu regeln.

[0026] Darüber hinaus kann es von Vorteil sein, dass die Vorrichtung zur elektrischen Erregung eines piezoelektrischen Aktors eines Ultraschallmotors einen Regler für die elektrische Spannung, die den Leistungsverstärker speist, aufweist. Dies ermöglicht es ebenso, den Strom I_p und damit die Bewegungsgeschwindigkeit des anzutreibenden Elements zu regeln.

[0027] Es kann sich als günstig erweisen, dass die Vorrichtung zur elektrischen Erregung eines piezoelektrischen Aktors eines Ultraschallmotors ein Stabilisierungssystem für den durch den Stehwellengenerator fließenden piezoelektrischen Strom aufweist.

[0028] Außerdem kann es sich als günstig erweisen, dass die elektronischen Glieder der Vorrichtung zur elektrischen Erregung eines piezoelektrischen Aktors eines Ultraschallmotors teilweise oder vollständig durch einen programmierbaren Digitalprozessor des Typs DSP (Digitaler Signal-Prozessor oder Digital Signal Processor) oder FPGA (Field Programmable Gate Array) realisiert sind. Hierdurch ist es möglich, den Aufbau der elektrischen Erregervorrichtung zu vereinfachen und damit deren Kosten zu senken und gleichzeitig deren Störunempfindlichkeit zu erhöhen.

[0029] **Kurze Beschreibung der Zeichnungen**

[0030] Es zeigen in schematischer und nicht maßstabsgetreuer Weise:

[0031] Fig. 1: Erfindungsgemäße Erregervorrichtung für den Aktor eines Ultraschallmotors; (Darstellungen 10 bis 12: unterschiedliche Ausrichtungen des Polarisationsvektors in Bezug auf die Elektroden bei dreischichtiger Struktur des Aktors; Darstellung 13: Aktor in Multilayerausführung)

[0032] Fig. 2: Erfindungsgemäße Erregervorrichtung (Darstellungen 17 bis 19: ein- und mehrphasige Ansteuerung des Aktors)

[0033] Fig. 3-5: Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Erregervorrichtung

- [0034] Fig. 6, 7: Unterschiedliche Ausführungsformen für das Impulsfilter
- [0035] Fig. 8: Ersatzschaltung für den Stehwellengenerator
- [0036] Fig. 9: Frequenzabhängigkeit der Ströme (Darstellung 40) und der Phasenunterschiede (Darstellung 41) des Ultraschallwellengenerators der erfindungsgemäßen Erregervorrichtung
- [0037] Fig. 10: Darstellungen 42-45: Zeitabhängigkeit der verschiedenen elektrischen Spannungen und Ströme
- [0038] Fig. 11: Frequenzabhängigkeiten des Ultraschallwellengenerators
- [0039] Fig. 12: Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung bei Veränderung der Frequenz der Erregerspannung
- [0040] Fig. 13-17: Weitere Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Erregervorrichtung
- [0041] Fig. 1 zeigt eine erfindungsgemäße Erregervorrichtung für einen Ultraschallaktor 2 eines Ultraschallmotors 1. In diesem Ultraschallmotor 1 ist der Ultraschallaktor 2 mittels einer Friktionsverbindung bzw. mittels eines Friktionskontakts 3 mit einem antreibenden Element 4, das eine Linear- oder Drehbewegung vollführt, verbunden.
- [0042] Der Aktor 2 besteht aus einem als Platte ausgeführten akustischen Resonator 5, der jedoch ebenso als Scheibe, als Zylinder oder in einer anderen beliebigen Form, die durch die Konstruktion des Ultraschallaktors 2 vorgegeben ist, ausgeführt sein kann. Der Resonator 5 besteht aus piezokeramischem Material, kann jedoch auch aus Metall, Oxidkeramik, Metallkeramik, einem monokristallinen Material oder einem anderen Werkstoff mit hoher mechanischer Güte sein. Der Resonator 5 kann einen geschlossenen oder einen offenen Wellenleiter für die akustische Ultraschallwelle darstellen.
- [0043] Der Resonator 5 weist einen Generator 6 für die akustische Stehwelle auf. Dieser ist Teil des Resonators 5. Demgegenüber kann der Generator 6 auch ein Piezoelement darstellen, das mit dem Resonator 5 verbunden ist (in den Fig. nicht dargestellt). Der Generator 6 gemäß Fig. 1 hat eine dreischichtige Struktur, wobei eine Schicht die Erreger Elektrode 7 und eine Schicht die allgemeine Elektrode 8 darstellt, und zwischen der Erreger Elektrode 7 und der allgemeinen Elektrode 8 eine Schicht piezoelektrischer Keramik 9 angeordnet ist. Der Polarisationsvektor der Piezokeramikschiicht ist senkrecht zu den Elektroden 7, 8 ausgerichtet, wie dies auch in Darstellung 10 von Fig. 1 dargestellt ist. Es ist jedoch ebenso denkbar, dass der Polarisationsvektor der Piezokeramikschiicht geneigt zu den Elektroden 7, 8 (Darstellung 11 von Fig. 1) oder parallel zu den Elektroden 7, 8 (Darstellung 12 von Fig. 1) ausgerichtet ist. Weiterhin ist denkbar, dass der Polarisationsvektor in unterschiedlichen Bereichen des Generators 6 unterschiedliche Ausrichtung besitzt. Hierbei ist zudem denkbar, dass der Polarisationsvektor in einem Bereich eine senkrechte Ausrichtung besitzt, und in einem anderen Abschnitt zwar ebenso eine senkrechte, aber entgegengesetzte Ausrichtung, d.h. eine

antiparallele Ausrichtung, besitzt.

- [0044] Es ist möglich, dass der Generator 6 eine Multilayerstruktur aufweist, in der die Elektroden 7, 8 und die piezokeramische Schicht 9, wie in Darstellung 13 der Fig. 1 gezeigt, abwechselnd angeordnet sind. Hierbei sind die im vorherigen Abschnitt beschriebenen unterschiedlichen Ausrichtungen des Polarisationsvektors in den einzelnen Schichten denkbar.
- [0045] Zudem kann der Stehwellengenerator streifenförmige Elektroden aufweisen (in den Fig. nicht dargestellt).
- [0046] Zum Anlegen einer elektrischen Spannung haben die Elektroden 7 und 8 die Ausgänge 14, 15. Die Ausgänge 14, 15 sind als litzenartige Leiter ausgeführt, sie können jedoch ebenso als Federelemente oder elektrisch leitende Gummielemente ausgeführt sein.
- [0047] Zwischen den Elektroden 7 und 8 des Generators 6 ist die elektrische Kapazität C_0 vorhanden.
- [0048] Der Generator 6 dient zur Erzeugung einer akustischen Ultraschallstehwelle im Resonator 5, die der Ultraschallmotor für seinen Betrieb nutzt. Diese Welle kann eine Longitudinalwelle, eine Biegewelle, eine Scherwelle, eine Torsionswelle, eine Volumenwelle, eine ebene Welle, eine Oberflächenwelle, eine symmetrische, eine asymmetrische oder eine andere akustische Welle sein. Typ und Form der genutzten Welle werden durch die geometrische Form des Resonators 5, die Form der Elektroden 7 und 8, die Ausrichtung des Polarisationsvektors der piezoelektrischen Keramik bezogen auf die Elektroden 7 und 8 und die Frequenz der Erregerspannung U_g bestimmt.
- [0049] Bei der im Aktor 2 erzeugten Welle besitzen die Punkte des Resonators 5 bei der Frequenz, die gleich der mechanischen Resonanzfrequenz F_m ist, ihre maximale Schwingungsgeschwindigkeit V_p . Die mechanische Resonanzfrequenz F_m stellt die Arbeitsfrequenz des Ultraschallaktors 2 und dementsprechend auch die des Ultraschallmotors 1 dar. Bei dieser Frequenz hat der Ultraschallmotor 1 optimale mechanische Kennwerte.
- [0050] Die elektrische Erregervorrichtung 20 weist einen Leistungsverstärker 21, ein Rückkopplungselement 22, ein Impulsfilter 23 für die vom Rückkopplungselement 22 bereitgestellte Spannung u_g , und eine Steuerspannungsformierungseinrichtung 24 auf. Der Leistungsverstärker 21 ist als Spannungsumschalter 25 ausgeführt. Hierbei kann der Spannungsumschalter einen Halbbrücken- oder Brückenleistungsverstärker 26, oder einen Zweitaktleistungsverstärker 27 bilden. Der Leistungsverstärker 21 wird von der Gleichspannung E gespeist und stellt die rechteckige Wechselspannung U_g (siehe Darstellung 42 von Fig. 10) bereit. Die Ausgänge 14 und 15 der Elektroden 7, 8 des Generators der akustischen Welle 6 sind über das Rückkopplungselement 22 mit dem Leistungsverstärker 21 verbunden. Das Impulsfilter 23 besitzt den Eingang 31, an dem

die Spannung u_g anliegt, und den Ausgang 32, an dem die Spannung u_p anliegt. Das Impulsfilter 23 ist als Bandfilter 33 aufgebaut. Es kann jedoch auch als Tiefpassfilter 34 oder als Integrator 35 (siehe Fig. 6) aufgebaut sein. Zudem kann das Impulsfilter 23 ein Komparator oder eine Impulsvorrichtung 36 (siehe Fig. 7) sein. Ein solches Filter kann einen Ausschalter 37 für die vom Rückkopplungselement 22 bereitgestellte Spannung u_g enthalten, dessen Steuereingang 38 über den Flankendetektor 39 mit dem Spannungsumschalter 21 verbunden ist. Darüber hinaus kann das Impulsfilter 23 aus passiven oder aktiven elektronischen Bauelementen bestehen bzw. kann mit frei programmierbaren Mikrocontrollern aufgebaut sein.

- [0051] Das Rückkopplungselement 22 dient zur Umwandlung des durch den Generator 6 fließenden Stroms I_g in eine sich proportional zu diesem Strom verhaltende elektrische Spannung u_g . Es ist als niedrigohmiger Widerstand 29 ausgeführt, kann jedoch ebenso als Messtransformator für Strom-Spannung 30 (siehe Fig. 14) oder in einer anderen Ausführung realisiert sein.
- [0052] Gemäß den Darstellungen 17 bis 19 der Fig. 2 kann der Resonator 5 einen oder mehrere Zusatzgeneratoren 16 für eine akustische Welle mit den Elektroden 7 und 8 aufweisen. Die Zusatzgeneratoren 16 können mit Hilfe der Rechteckspannung U_g oder mit einer anderen Spannung mit beliebiger nicht-rechteckiger Form angesteuert werden. Die Zusatzgeneratoren 16 im Aktor 2 können eine akustische Ultraschallwelle gleichen Typs wie die des (Haupt-)Generators 6 erzeugen; sie können jedoch ebenso eine akustische Ultraschallwelle anderen Typs als die des (Haupt-)Generators 6 produzieren. Zudem können die Zusatzgeneratoren 16 die gleiche oder eine von F_m abweichende mechanische Resonanzfrequenz aufweisen, z. B. F_z . Außerdem können die Zusatzgeneratoren 16 eine von der Kapazität C_o des Generators 6 abweichende Kapazität aufweisen, z. B. C_z .
- [0053] Gemäß Darstellung 17 der Fig. 2 kann der Aktor 2 einphasig und gemäß Darstellung 18 der Fig. 2 zweiphasig ausgeführt sein. Eine entsprechende dreiphasige Ausführung ist in Darstellung 19 der Fig. 2 gezeigt. Selbstverständlich ist auch eine Ansteuerung mit mehr als drei Phasen denkbar.
- [0054] Bei gemeinsamer Erregung der Generatoren 6 und 16 können sich im Aktor 2 zwei, drei oder mehr Stehwellen unabhängig voneinander ausbreiten. Die im Aktor 2 sich ausbreitenden Stehwellen können reine Laufwellen oder eine Kombination von Lauf- und Stehwellen sein.
- [0055] Gemäß Fig. 4 und Fig. 5 sind die Ausgänge 14 und 15 der Elektroden 7, 8 des Stehwellengenerators 6 mit Hilfe des Anpassungstransformators 28 mit dem Leistungsverstärker 21 verbunden.
- [0056] Fig. 8 zeigt eine Ersatzschaltung zur Abbildung der elektromechanischen Parameter des Stehwellengenerators 6 für den Ultraschallmotor 1 für den Bereich der me-

chanischen Resonanzfrequenz F_m . In dieser Schaltung bedeuten: C_o = elektrische Kapazität, die sich zwischen den Elektroden 7 und 8 ausbildet; L_m = elektrische Induktivität, welche proportional zur Masse des Aktors 2 ist; C_m = elektrische Kapazität, welche proportional zur elastischen Nachgiebigkeit des Aktors 2 ist; R_m = elektrischer Widerstand, welcher proportional zu den mechanischen Verlusten im Aktor 2 ist; R_l = elektrischer Widerstand, welcher proportional zum mechanischen Widerstand der Last am Aktor 2 ist.

- [0057] An die Schaltung wird die elektrische Spannung U_g angelegt, welche bewirkt, dass durch die Schaltung der Strom I_g fließt. Dieser Strom fließt über die Ausgänge 14, 15 und die Elektroden 7, 8 des Stehwellengenerators 6.
- [0058] Der Strom I_g ist ein Summenstrom aus folgenden zwei Bestandteilen: I_c = Lade- und Entladestrom der elektrischen Kapazität C_o des Generators 6, und I_p = piezoelektrischer Strom, vorgegeben durch den Drehwinkel der Domänen der piezoelektrischen Keramikschicht 9 des Generators 6, der die Schwingungsgeschwindigkeit V_p (oder die Schwingungsamplitude) des Generators 6 wiedergibt.
- [0059] Wenn die Spannung U_g – entgegen der Idee der vorliegenden Erfindung - eine sinusförmige Spannung darstellt, weisen auch die Ströme I_g , I_c und I_p (V_p) eine Sinusform auf. In diesem Fall besitzen die Amplitude des Stroms I_g und die Amplitude des Stroms I_p (V_p) die in Darstellung 40 der Fig. 9 dargestellte Abhängigkeit. Die Darstellung 41 in Fig. 9 zeigt die Abhängigkeit der Phasenverschiebung der Spannung U_g und des Stroms I_g von der Frequenz.
- [0060] In den Darstellungen 40 und 41 der Fig. 9 sind besondere Frequenzen erkennbar. Dabei ist F_g die Resonanzfrequenz des Stroms I_g . Bei dieser Frequenz hat der Strom I_g seinen Maximalwert I_{gm} und der Winkel der Phasenverschiebung ϕ_g ist gleich ϕ_{gm} . F_m ist die mechanische Resonanzfrequenz des Stroms I_p (V_p). Bei dieser Frequenz hat der Strom I_p (V_p) seinen Maximalwert I_{pm} und der Winkel der Phasenverschiebung ϕ_g ist gleich ϕ_{pm} . F_o ist die Frequenz, bei der die Phasenverschiebung für den Strom I_g gleich Null ist. F_a ist die Antiresonanzfrequenz des Stroms I_g . Bei den Frequenzen F_o und F_a ist der Phasenverschiebungswinkel ϕ_g gleich Null.
- [0061] Das Verfahren zur Erregung des Aktors des Ultraschallmotors entsprechend der Patentschrift US 5,872,418 besteht im Gegensatz zu dem erfindungsgemäßen Verfahren gerade darin, dass an den Aktor – wie zuvor beschrieben - eine sinusförmige elektrische Spannung U_g angelegt wird und die Frequenzregelung dieser Spannung durch Stabilisierung der Phasenverschiebung ϕ_{pm} zwischen dieser Spannung und dem durch den Aktor fließenden Strom I_g erfolgt.
- [0062] Da bei der Frequenz F_m die Induktivität L_m durch die Kapazität C_m kompensiert wird, wird der Phasenverschiebungswinkel ϕ_{pm} durch die Kapazität C_o und der Summe der Widerstände $R_m + R_l$ bestimmt. Der Widerstand R_m ist wesentlich kleiner als der Wi-

derstand R_l . Deshalb hat eine Änderung des Widerstands der Last R_l eine Änderung des Winkels φ_{pm} für die Frequenz F_m zur Folge.

- [0063] Folglich führt in der Lösung gemäß der US 5,872,418 eine Änderung der auf den Aktor des Ultraschallmotors einwirkenden Last (R_l) zu einer Destabilisierung der Frequenz der Erregerspannung U_g . Diese Frequenz weicht damit von der mechanischen Resonanzfrequenz F_m ab. Bei größeren auf den Aktor einwirkenden Lasten kann die Destabilisierung eine bedeutende Größenordnung erreichen, was nachteilig für den Betrieb des Ultraschallmotors ist.
- [0064] In der erfindungsgemäßen Lösung wird an den Generator 6 des Aktors 2 hingegen eine elektrische Rechteckspannung U_g angelegt, deren Form in Darstellung 42 der Fig. 10 gezeigt ist. Die Vorder- und Rückflanken jedes Spannungsimpulses bewirken eine schnelle Auf- und Entladung der Kapazität C_o . Das Auf- und Entladen der Kapazität C_o erfolgt in der sehr kurzen Zeit T_c , die um ein mehrfaches kleiner als die Periode T_g der Erregerspannung U_g ist. Diese Zeit wird durch den kleinen Widerstand des leitenden Transistors des Verstärkers 26 und der Größe der Kapazität C_o bestimmt. Deshalb stellt der Strom I_c eine Serie von kurzen Impulsen dar, wie dies aus Abbildung 43 der Fig. 10 zu erkennen ist. Die Stromimpulse I_c fallen zeitlich mit den Flanken der Impulse der Rechteckspannung U_g zusammen.
- [0065] Mit dem Strom I_c fließt durch den Generator 6 der piezoelektrische Strom I_p , der sich proportional zur Schwingungsgeschwindigkeit V_p verhält. Da der Generator 6 Teil des akustischen Resonators 5 ist, weist der Strom I_p eine Sinusform auf (siehe Darstellung 44 von Fig. 10).
- [0066] Der Summenstrom I_g besteht aus dem Strom I_c und dem Strom I_p , der durch die Elektroden 7, 8 des Generators 6 (siehe Darstellung 45 von Fig. 10) fließt.
- [0067] Da bei der mechanischen Resonanzfrequenz F_m die Induktivität L_m durch die Kapazität C_m kompensiert wird, stellt bei dieser Frequenz der Strom I_p einen aktiven Strom bzw. Wirkstrom dar, d.h. die Phasenverschiebung des Stromes ist - bezogen auf die rechteckige Erregerspannung U_g - gleich Null.
- [0068] Aus dem zuvor Gesagten folgt, dass bei der erfindungsgemäßen Erregung des Generators 6 mit einer Rechteckspannung U_g der Frequenz F_m eine Änderung des Lastwiderstandes R_l zu keiner Änderung der Phase des Stroms I_g führt, d.h. der Phasenunterschied bleibt gleich Null.
- [0069] Bei Verringerung der Frequenz der Erregerspannung U_g von F_m auf F_c beginnt der Strom I_{pc} der Spannung U_g um den Winkel φ_{pc} vorauszuweichen, d.h. der piezoelektrische Strom nimmt einen kapazitiven Charakter an. Bei einer Erhöhung der Frequenz der Erregerspannung von F_m auf F_i beginnt der Strom I_{pi} der Spannung U_g um den Winkel φ_{pi} hinterherzulaufen, d.h. der piezoelektrische Strom nimmt einen induktiven Charakter an (siehe hierzu auch Fig. 11, 12). Die Abhängigkeit der Phasenver-

schiebung des piezoelektrischen Stromes I_p (V_p) von der Frequenz F hat über den gesamten Bereich eine glatte und eindeutige Abhängigkeit, wie aus Darstellung 47 der Fig. 11 ersichtlich.

- [0070] Vom Aufbau her bildet die elektrische Erregervorrichtung 20 der Erfindung ein System zur Regelung der Frequenz der Erregerspannung U_g und nutzt dazu die Stabilisierung des Phasenverschiebungswinkels zwischen der Rechteckerregerspannung U_g und dem piezoelektrischen Strom I_p .
- [0071] Hierbei sind verschiedene Prinzipien für die Frequenzregelung denkbar. Beispielsweise kann die Erregervorrichtung 20 ein Autogenerator mit positiver Rückkopplung sein, wobei bei der Frequenz F_m der Phasenverschiebungswinkel im Rückkopplungskreis gleich Null und der Verstärkungskoeffizient größer eins ist. In diesem Fall ist die Steuerspannungsformierungsvorrichtung 24 als begrenzender Verstärker 48 ausgeführt (siehe Fig. 13).
- [0072] Die Erregervorrichtung 20 kann zudem ein PLL-System zur Frequenzregelung mit negativer Rückkopplung sein. In diesem Fall besteht die Steuerspannungsformierungseinrichtung 24 aus einem Phasendetektor 49 mit einem Referenzeingang 50 und einem Messeingang 51 sowie einem gesteuerten Generator 52 (siehe Fig. 14).
- [0073] Unabhängig vom angewandten Prinzip für die Frequenzregelung umfasst die elektrische Erregervorrichtung 20 einen symmetrischen PWM-Modulator 53 mit einem Steuereingang 54, wobei die Erregerspannung U_g eine breitenmodulierte Rechteckspannung darstellt.
- [0074] Fig. 15 zeigt eine elektrische Erregervorrichtung 20, die einen Regler 55 für die elektrische Versorgungsspannung E enthält, die die Spannungsversorgung für den Leistungsverstärker 21 mit einem Steuereingang 56 darstellt. Dieser Regler 55 kann z. B. als DC-DC-Wandler ausgeführt sein, der wie ein PWM-Modulator arbeitet.
- [0075] Fig. 16 zeigt eine Variante der elektrischen Erregervorrichtung 20, die ein Stabilisierungssystem 57 für den durch den Stehwellengenerator 6 fließenden piezoelektrischen Strom I_p aufweist. Dazu hat das Stabilisierungssystem 57 einen mit dem Ausgang 32 des Impulsfilters 23 verbundenen Messeingang 58.
- [0076] Fig. 17 zeigt eine elektrische Erregervorrichtung 20, in der die Funktion der elektrischen Glieder Impulsfilter 23, Steuerspannungsformierungsvorrichtung 24, Bandfilter 33, Tiefpassfilter 34, Integrator 35, Impulsvorrichtung 36, Phasendetektor 49, gesteuerter Generator 52 und Stabilisierungssystem 57 teilweise bzw. vollständig durch einen entsprechend programmierten Digitalprozessor des Typs DSP oder FPGA realisiert sind. Der Digitalprozessor 59 kann den Interfaceport 60 aufweisen.
- [0077] Es ist möglich, das anzutreibende Element 4 des Ultraschallmotors 1 mit einem Lagegeber 61 auszustatten, dessen Ausgang 62 mit dem Digitalprozessor 59 verbunden ist.

[0078] **Funktionsbeschreibung**

- [0079] Das erfindungsgemäße Verfahren zur elektrischen Erregung des Aktors 2 des Ultraschallmotors 1 beruht darauf, dass an die Erregerelektrode 7 und die allgemeine Elektrode 8 des Hauptgenerators 6 für die akustische Ultraschallstehwelle des Aktors 2 die elektrische Rechteckerregerspannung U_g angelegt wird, deren Frequenz F sich zu Beginn geringfügig von der mechanischen Resonanzfrequenz F_m des Aktors 2 unterscheidet. Anschließend wird durch das Rückkopplungselement 22 die elektrische Spannung u_g , welche der durch den Generator 6 des Aktor 2 fließenden Stroms I_g proportional ist, abgegriffen. Danach wird mit Hilfe des Impulsfilters 23 die Spannung u_p , die sich proportional zum piezoelektrischen Strom I_p verhält, aus der Spannung u_g , die proportional dem Lade- und Entladestrom I_c der Kapazität C_o ist, separiert. Als nächstes wird die Frequenz F der Rechteckerregerspannung U_g so geändert, dass sich die Phasenverschiebung φ_p zwischen dem piezoelektrischen Strom I_p und der Rechteckerregerspannung U_g dem Wert Null nähert bzw. gleich Null wird. Der durch den Generator 6 für die akustische Stehwelle des Aktors 2 fließende piezoelektrische Strom I_p kann hierbei stabilisiert sein.
- [0080] Die erfindungsgemäße elektrische Erregervorrichtung 20 des Aktors 2 des Ultraschallmotors 1 funktioniert folgendermaßen: beim Anlegen der Versorgungsspannung E stellt der Leistungsverstärker 21 (25, 26, 27) eine elektrische Rechteckerregerspannung U_g bereit, deren Frequenz F sich geringfügig von der der mechanischen Resonanzfrequenz F_m des Aktors 2 unterscheidet. Diese Spannung wird an die Ausgänge 14, 15 der Elektroden 7, 8 des Generators 6 gelegt. Die Spannung bewirkt, dass durch den Generator 6 und das Rückkopplungselement 22 (29, 30) der Strom I_g zu fließen beginnt. Am Rückkopplungselement 22 (29, 30) erscheint die Spannung u_g , die proportional dem Strom I_g ist. Durch das Impulsfilter 23 (33, 34, 35, 36) wird aus der Spannung u_g die Spannung u_p separiert, wobei sich u_p proportional zum piezoelektrischen Strom I_p und u_c sich proportional zum Lade- und Entladestrom I_c der Kapazität C_o verhält.
- [0081] Die Spannung u_p stellt eine Sinusspannung dar, deren Phase in der mechanischen Resonanzfrequenz F_m mit der Phase der Rechteckerregerspannung U_g übereinstimmt (oder um 180° gedreht ist). Die Frequenz-Phasencharakteristik der Spannung u_p stellt - bezogen auf die Rechteckerregerspannung U_g - eine glatte und eindeutige Abhängigkeit dar.
- [0082] Vorausgesetzt, die elektrische Erregervorrichtung 20 ist als Autogenerator ausgeführt, fließt beim Einschalten der Versorgungsspannung E durch den Generator 6 ein Impulsstrom, so dass als Ergebnis in der elektrischen Erregervorrichtung 20 ein Schwingungsprozess mit der mechanischen Resonanzfrequenz F_m einsetzt. Da bei der mechanischen Resonanzfrequenz F_m der auf das Rückkopplungselement 22 bezogene

Phasenverschiebungswinkel gleich Null ist und dieser Winkel nicht von der Last am Aktor abhängt, schwingt die elektrische Erregervorrichtung 20 bei einer beliebigen Last am Aktor 2 auf der mechanischen Resonanzfrequenz F_m .

- [0083] Wenn die elektrische Erregervorrichtung 20 ein PLL-System zur Frequenzregelung mit negativer Rückkopplung darstellt, stabilisiert dieses System den Phasenverschiebungswinkel φ_p zwischen der elektrischen Rechteckspannung u_g und der Spannung u_p , d. h. dem piezoelektrischen Strom I_p so, dass sie gleich Null ist. Dabei stellt die elektrische Erregervorrichtung 20 die Spannung U_g bereit, deren Frequenz bei einer beliebigen Last am Aktor 2 immer gleich der mechanischen Resonanzfrequenz F_m ist.
- [0084] Die zusätzliche Stabilisierung des piezoelektrischen Stromes I_p mit Hilfe des Stabilisierungssystems 57 ermöglicht es, die Schwingungsgeschwindigkeit V_p zusätzlich zu stabilisieren, und damit auch die Bewegungsgeschwindigkeit des anzutreibenden Elements 4.
- [0085] Durch die Verwendung von Halbbrücken- oder Brückenverstärkern 26 bzw. von Zweitaktleistungsverstärkern 27 ist es möglich, den inneren Widerstand des Spannungsumschalters 25 maximal zu verringern und damit die Impulsdauer t_c des kapazitiven Stromes I_c maximal zu verkürzen.
- [0086] Durch den Einsatz eines niederohmigen Widerstands 29 oder eines Messtransformator 30 als Rückkopplungselement 22 ist es möglich, den Phasenfehler bei der Wandlung des Stroms I_g in die Spannung u_g maximal zu reduzieren.
- [0087] Die Ausführung des Impulsfilters 23 als Bandfilter 33 ermöglicht es, den Phasenfehler bei der mechanischen Resonanzfrequenz F_m zu eliminieren, während es die Auslegung des Impulsfilters 23 als Tiefpassfilter 34 oder als Integrator 35 möglich macht, diese Filter äußerst einfach aufzubauen.
- [0088] Durch die Auslegung des Impulsfilters 23 als Impulseinrichtung 36 ist es möglich, den Phasenfehler im gesamten Arbeitsfrequenzbereich der Erregervorrichtung 20 zu eliminieren.
- [0089] Durch Verwendung eines symmetrischen PWM-Modulators 53 oder eines Reglers für die elektrische Versorgungsspannung in der elektrischen Erregervorrichtung 20 ist es möglich, den Strom I_p (V_p) zu regeln, und damit die Bewegungsgeschwindigkeit des anzutreibenden Elements 4.
- [0090] Die Ausführung der elektronischen Glieder als Digitalprozessor 59 macht es möglich, die elektrische Erregervorrichtung 20 und deren Aufbau zu vereinfachen, seine Kosten zu senken und seine Störuneempfindlichkeit zu erhöhen.
- [0091] Das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung ermöglichen es, die Frequenz der Erregerspannung für den Ultraschallaktor optimal zu halten. Diese Frequenz wird unabhängig von der auf den Aktor des Ultraschallmotors einwirkenden Lasten andauernd gleich der mechanischen Resonanzfrequenz des

Aktors gehalten. Dies erhöht die Betriebsstabilität des Ultraschallmotors. Dadurch, dass der Ultraschallmotor stets in einem optimalen Betriebsregime arbeitet, verringert sich die Höhe der Erregerspannung, und der zum Betrieb erforderliche Strom bzw. die zum Betrieb erforderliche Leistung werden reduziert. Der Motor erhitzt sich weniger stark, was seinen Temperatureinsatzbereich erweitert.

Ansprüche

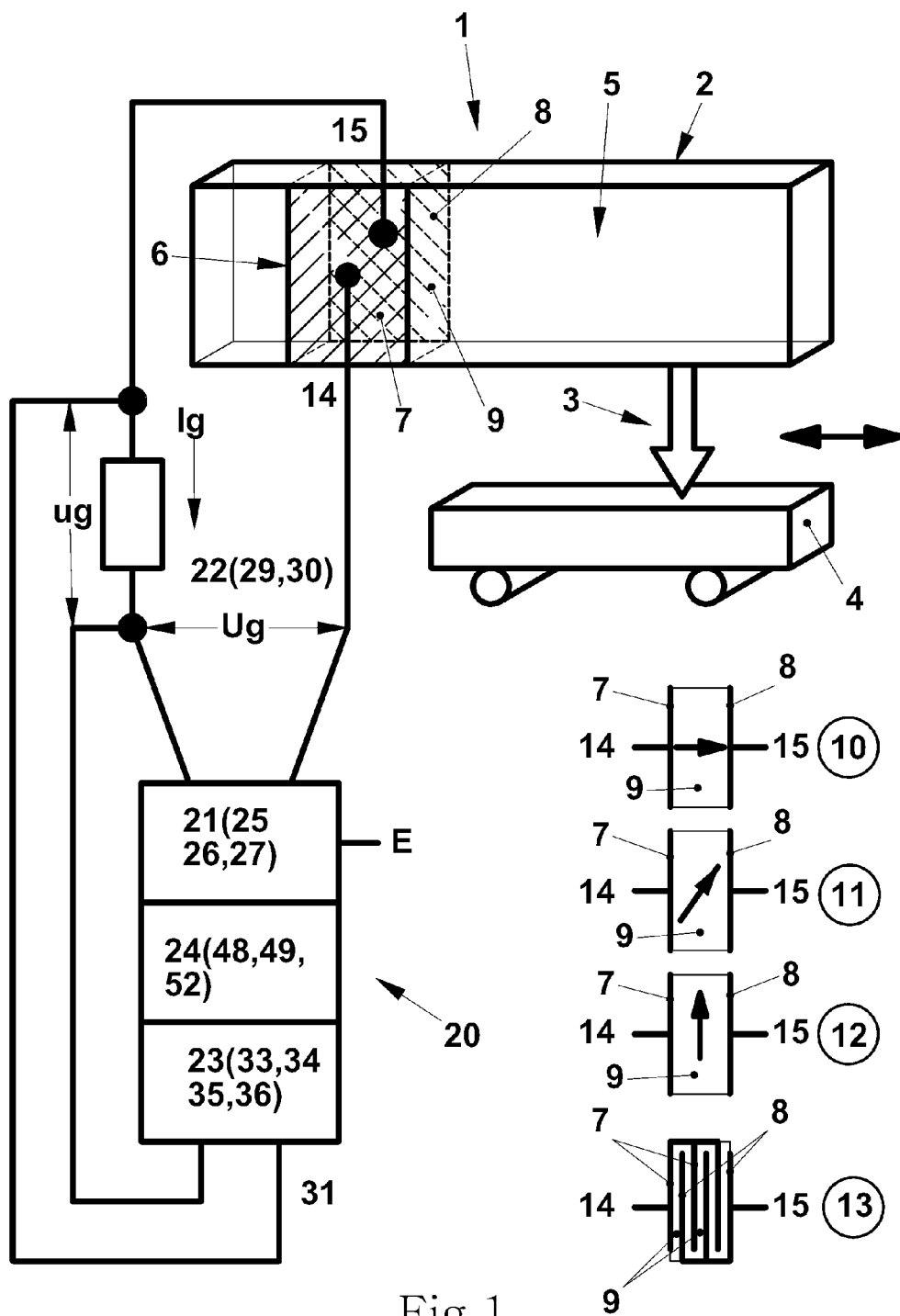
- [Anspruch0001] Verfahren zur elektrischen Erregung eines piezoelektrischen Aktors eines Ultraschallmotors mit einer mechanischen Resonanzfrequenz F_m , wobei der Ultraschallaktor wenigstens einen akustischen Stehwellengenerator aufweist, der eine Erregerelektrode und eine allgemeine Elektrode umfasst, wobei sich zwischen der Erregerelektrode und der allgemeinen Elektrode eine elektrische Kapazität C_o ausbildet, **gekennzeichnet durch folgende Schritte:** Anlegen einer rechteckigen Erregerspannung U_g an die Erregerelektrode und die allgemeine Elektrode des wenigstens einen akustischen Stehwellengenerators, wobei sich die Frequenz der rechteckigen Erregerspannung U_g von der mechanischen Resonanzfrequenz F_m des Aktors unterscheidet; Bereitstellung einer elektrischen Spannung u_g mit Hilfe eines Rückkopplungselements, wobei die elektrische Spannung u_g proportional zu einem durch den Stehwellengenerator fließenden Strom I_g ist, der ein Summenstrom aus einem piezoelektrischen Strom I_p sowie einem Lade- und Entladestrom I_c der elektrischen Kapazität C_o ist; Separierung einer elektrischen Spannung u_p von einer elektrischen Spannung u_c mit Hilfe eines Impulsfilters, wobei die elektrische Spannung u_p proportional zum piezoelektrischen Strom I_p und die elektrische Spannung u_c proportional zum Lade- und Entladestrom I_c der elektrischen Kapazität C_o ist; Ändern der Frequenz der rechteckigen Erregerspannung dergestalt, dass die Phasenverschiebung zwischen dem piezoelektrischen Strom I_p und der rechteckigen Erregerspannung U_g im Wesentlichen Null wird.
- [Anspruch0002] Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der durch den Stehwellengenerator fließende piezoelektrische Strom I_p zusätzlich stabilisiert wird.
- [Anspruch0003] Vorrichtung zur elektrischen Erregung eines piezoelektrischen Aktors eines Ultraschallmotors, wobei der Aktor wenigstens einen akustischen Stehwellengenerator aufweist, umfassend wenigstens einen Leistungsverstärker, ein Rückkopplungselement, ein Filter, und eine Spannungsformierungseinrichtung, **dadurch gekennzeichnet**, dass der wenigstens eine Leistungsverstärker als Spannungsumschalter für eine Versorgungsspannung des Aktors ausgeführt ist und mit dem der wenigstens eine akustische Stehwellengenerator direkt oder indirekt verbunden ist, wobei das Rückkopplungselement in Reihe mit dem akustischen Stehwellengenerator geschaltet ist, so dass durch den

Rückkopplungselement der gleiche Strom wie durch den Stehwellengenerator fließt, und das Filter als Impulsfilter der elektrischen Spannung, die durch das Rückkopplungselement erzeugt wird, ausgeführt ist, und weiterhin der Ausgang des Filters mit einem Eingang der Steuerspannungsformierungseinrichtung verbunden ist, die mit einem Eingang des wenigstens einen Leistungsverstärkers verbunden ist.

- [Anspruch0004] Vorrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Spannungsumschalter als Halbbrückenleistungsverstärker oder als Brückenleistungsverstärker oder als Zweitaktleistungsverstärker ausgeführt ist.
- [Anspruch0005] Vorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Rückkopplungselement als ein niedrigohmiger Wirkwiderstand oder ein Messtransformator für einen elektrischen Strom ausgeführt ist.
- [Anspruch0006] Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Impulsfilter als ein auf die mechanische Resonanzfrequenz F_m des Aktors abgestimmtes Bandfilter für die vom Rückkopplungselement generierte Spannung ausgeführt ist.
- [Anspruch0007] Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Impulsfilter als Tiefpassfilter oder als Integrator für die durch das Rückkopplungselement erzeugte Spannung ausgeführt ist.
- [Anspruch0008] Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Impulsfilter einen Ausschalter für die vom Rückkopplungselement erzeugte Spannung umfasst, und ein Steuereingang des Impulsfilters über einen Flankendetektor mit dem Spannungsumschalter verbunden ist.
- [Anspruch0009] Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Impulsfilter als Spannungskomparator ausgeführt ist.
- [Anspruch0010] Vorrichtung nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass diese als Autogenerator ausgeführt ist.
- [Anspruch0011] Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuerspannungsformierungseinrichtung einen Phasendetektor und einen gesteuerten Generator für eine Rechteckspannung umfasst.
- [Anspruch0012] Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuerspannungsformierungseinrichtung einen symmetrischen PWM-Modulator aufweist.

- [Anspruch0013] Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass diese einen Regler für die elektrische Spannung, die den Leistungsverstärker speist, aufweist.
- [Anspruch0014] Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie ein Stabilisierungssystem für den durch den Stehwellengenerator fließenden piezoelektrischen Strom aufweist.
- [Anspruch0015] Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass deren elektronische Glieder teilweise oder vollständig durch einen programmierbaren Digitalprozessor des Typs DSP oder FPGA realisiert sind.

[Fig.]



[Fig.]

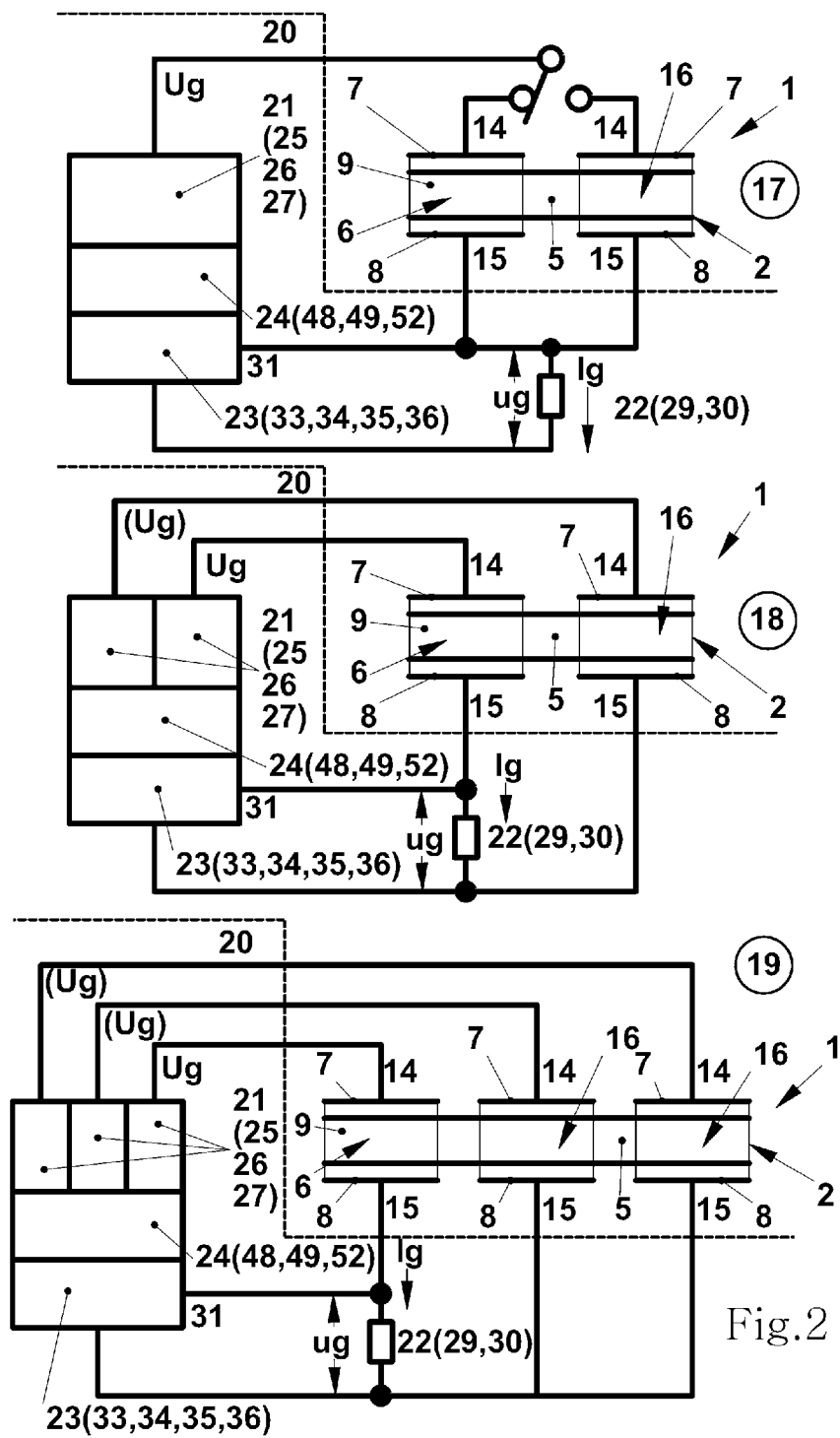
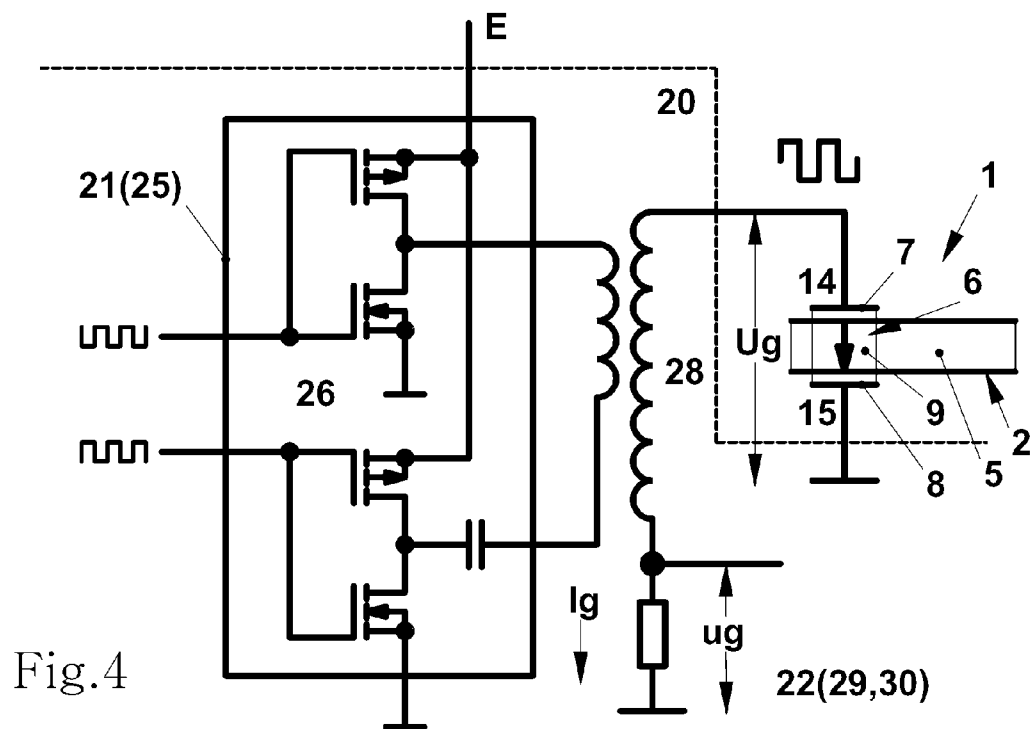
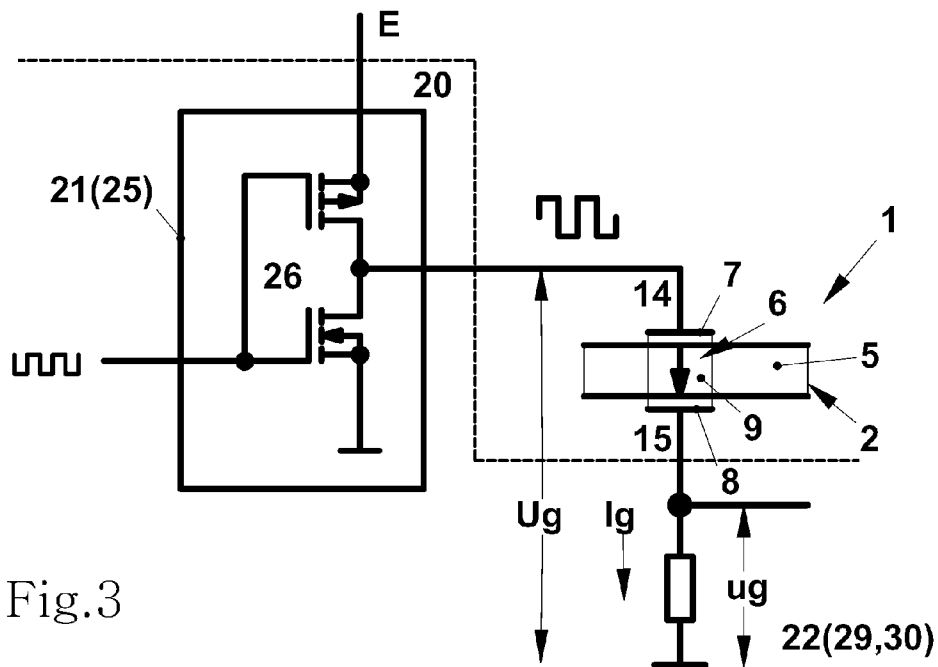


Fig.2

[Fig.]



[Fig.]

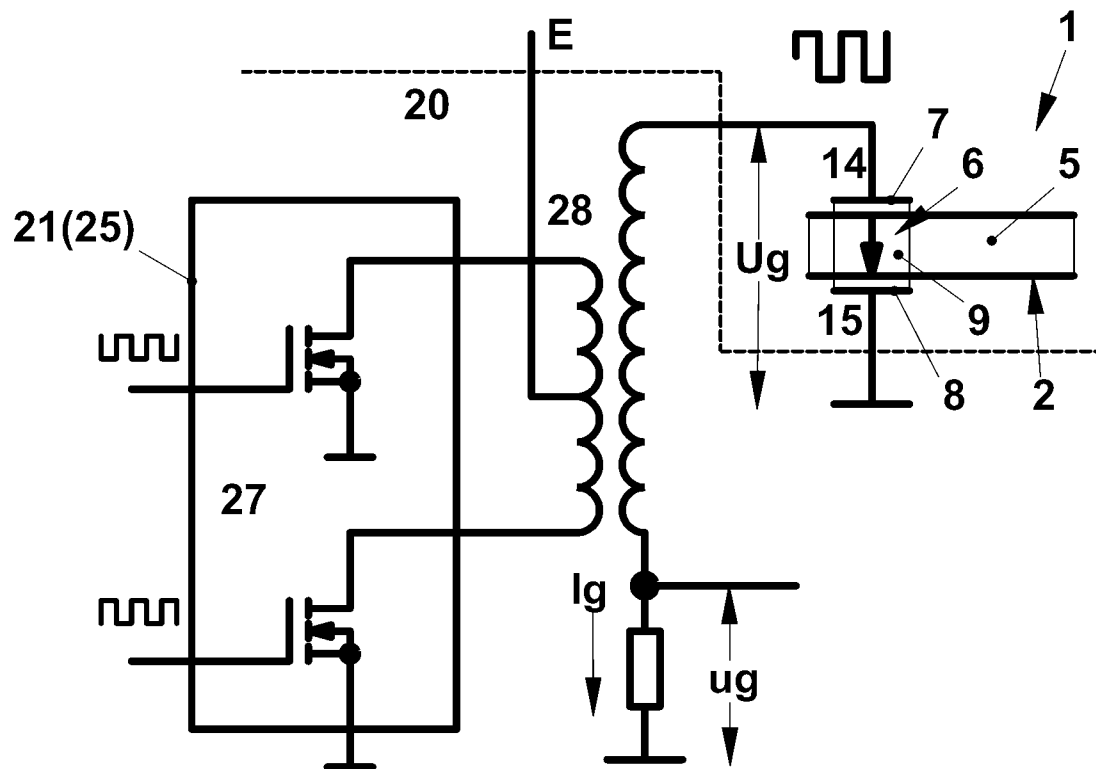


Fig.5

[Fig.]

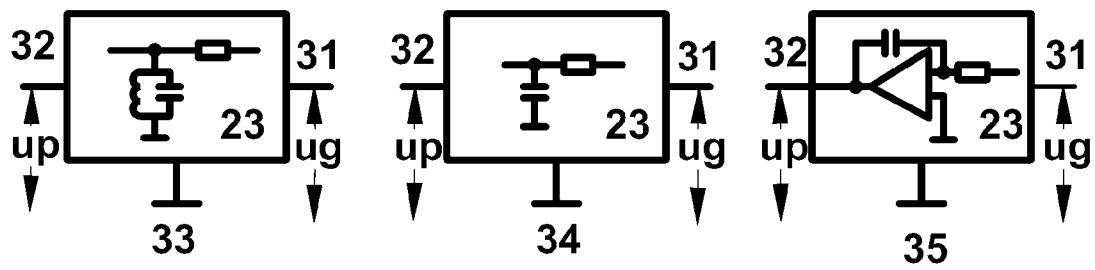


Fig.6

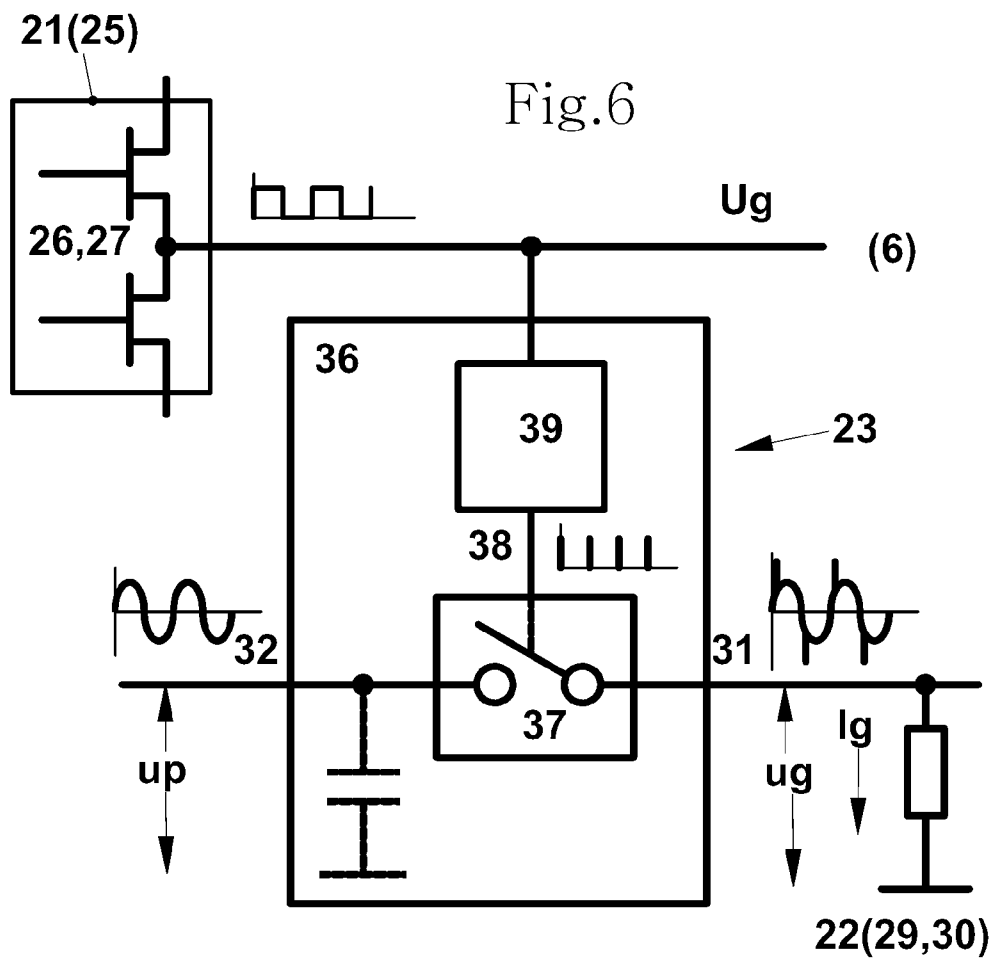


Fig.7

[Fig.]

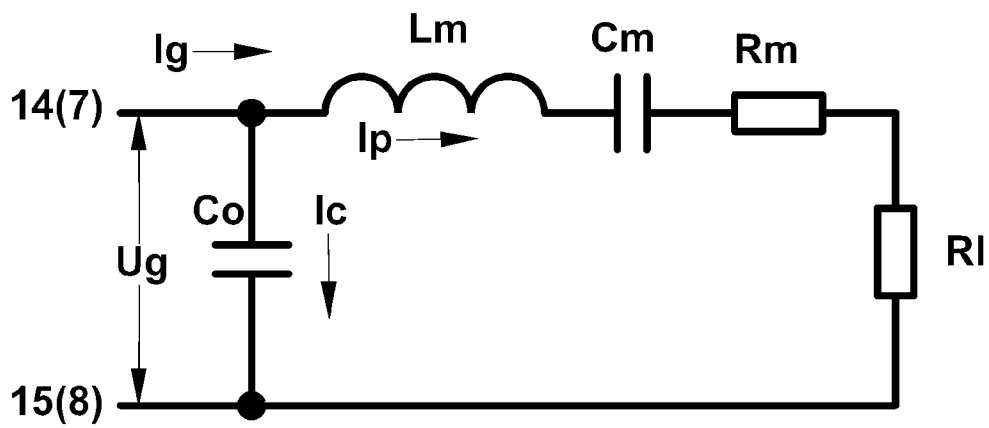


Fig.8

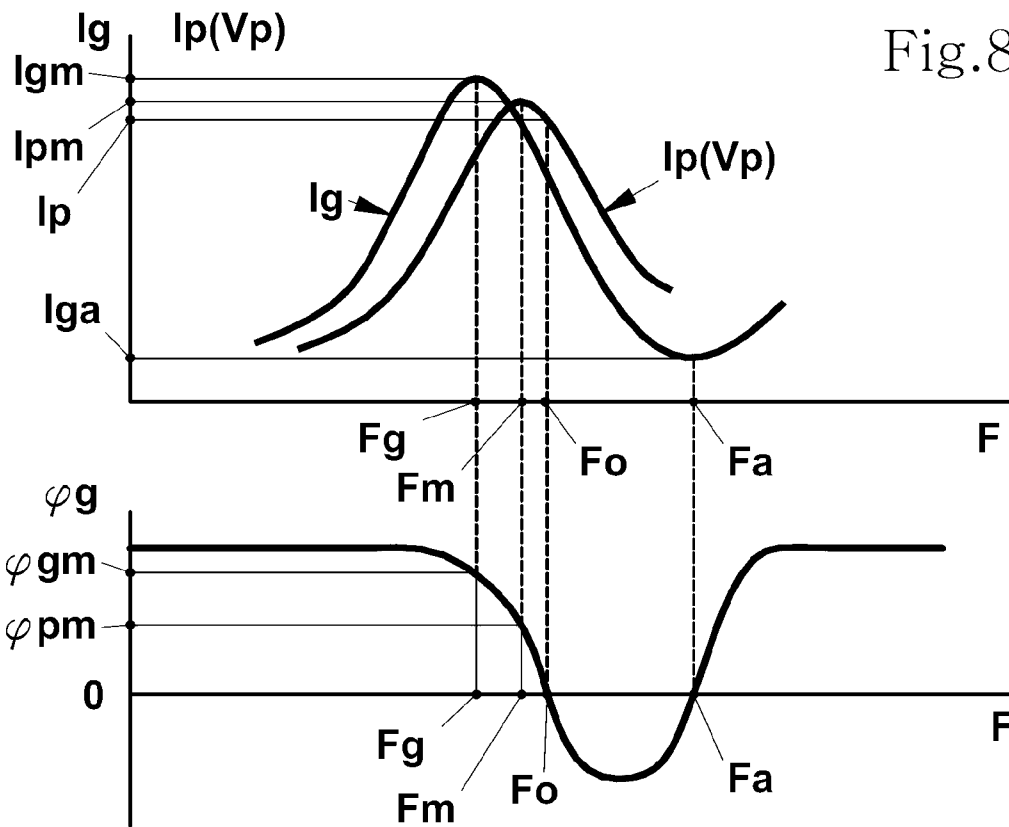


Fig.9

[Fig.]

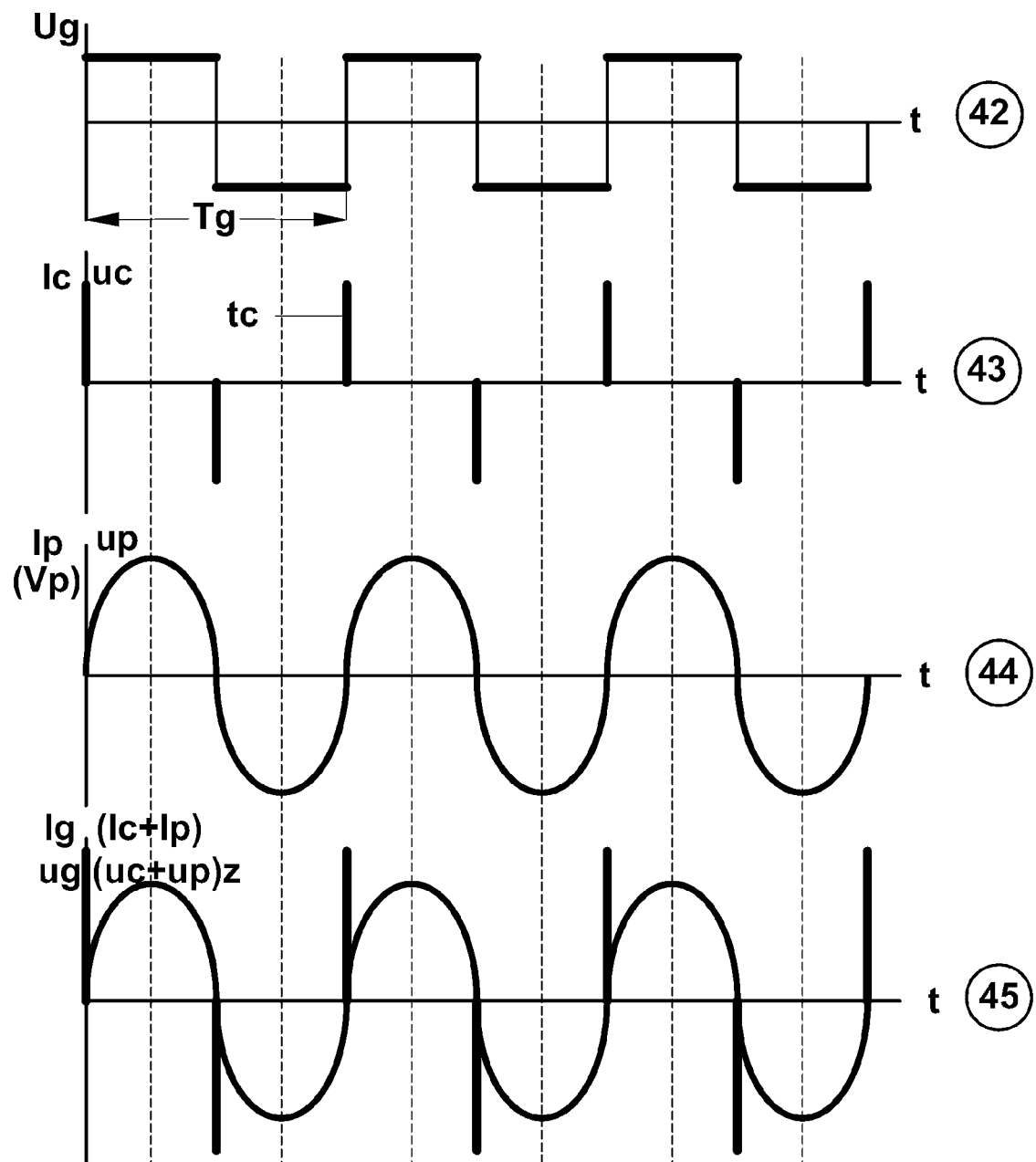


Fig.10

[Fig.]

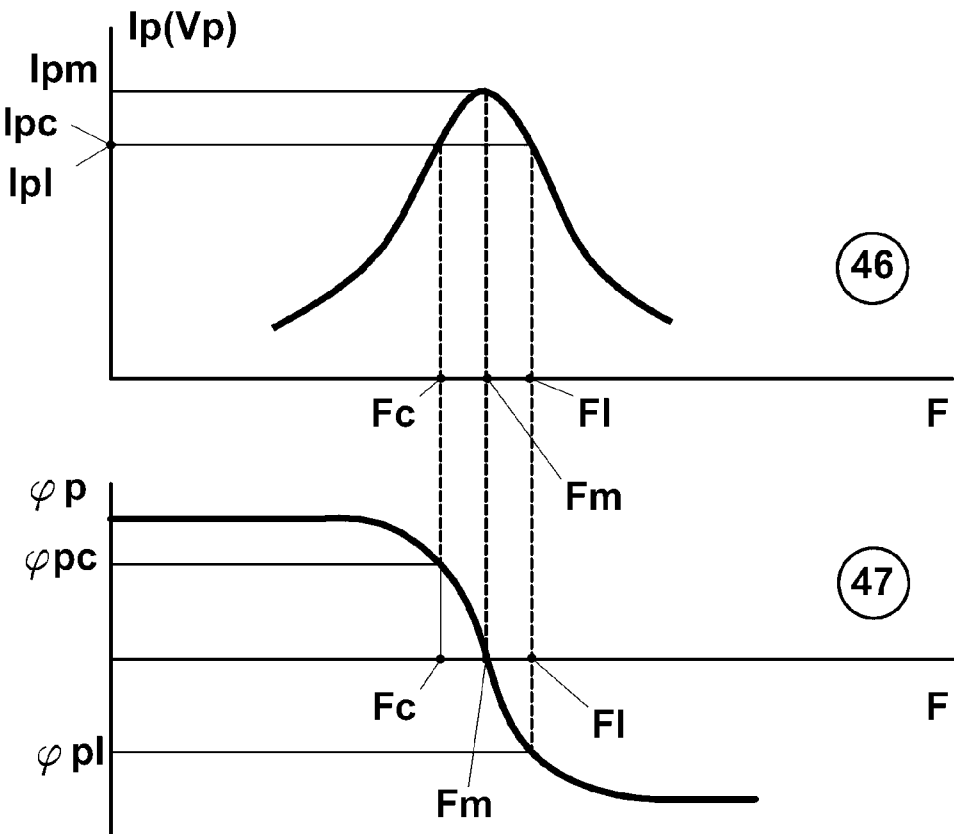


Fig.11

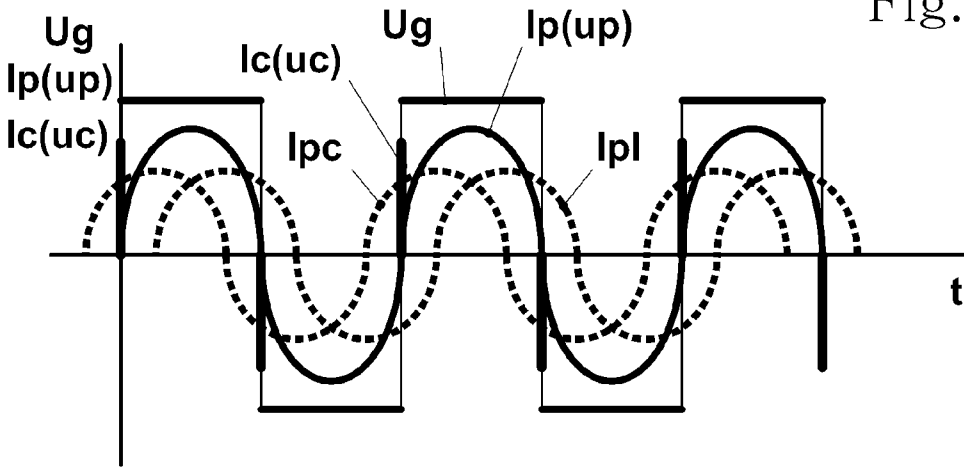
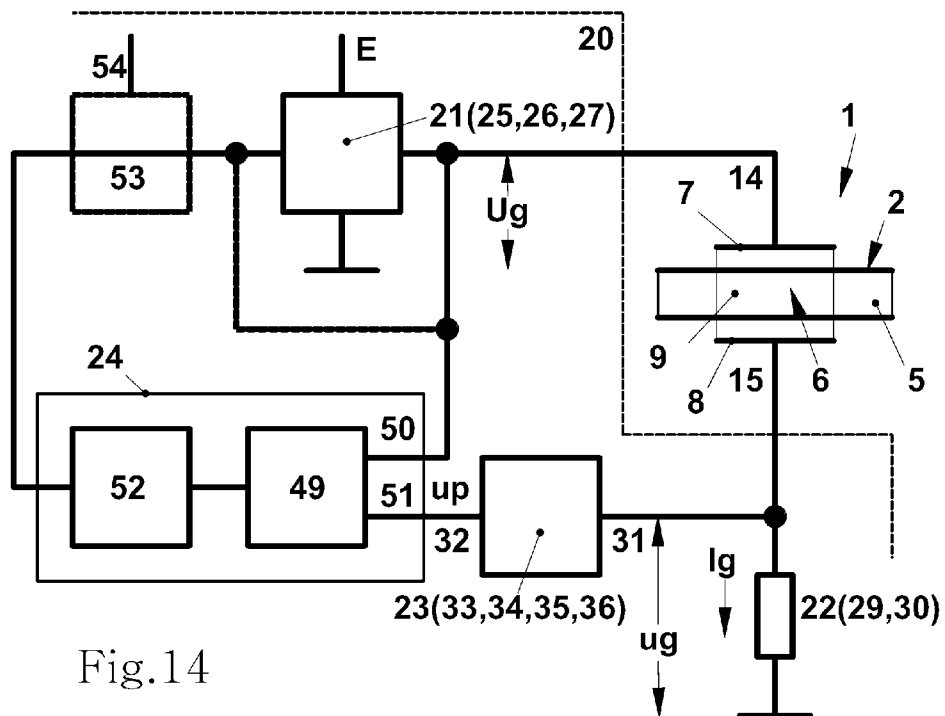
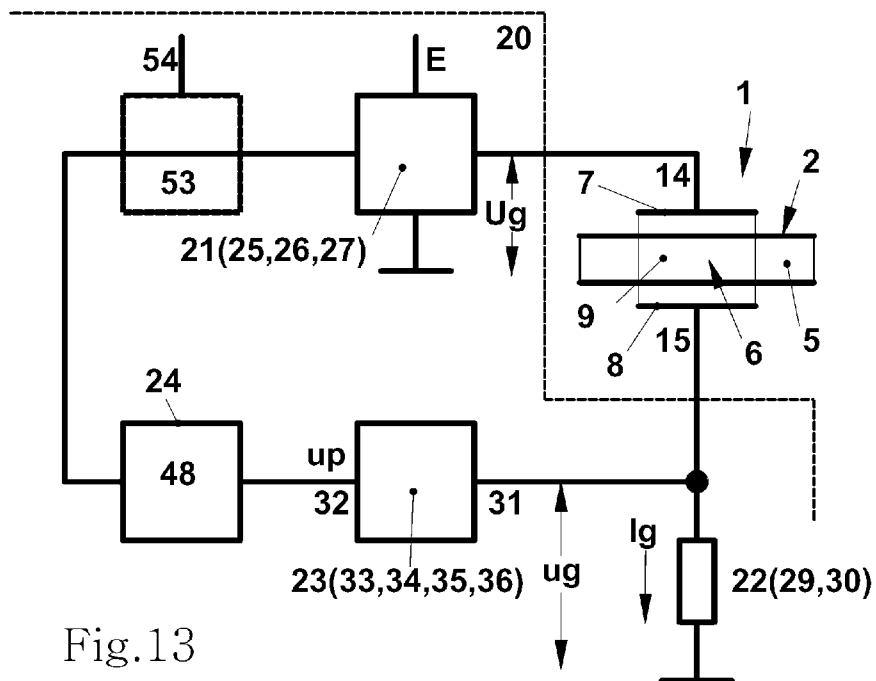


Fig.12

[Fig.]



[Fig.]

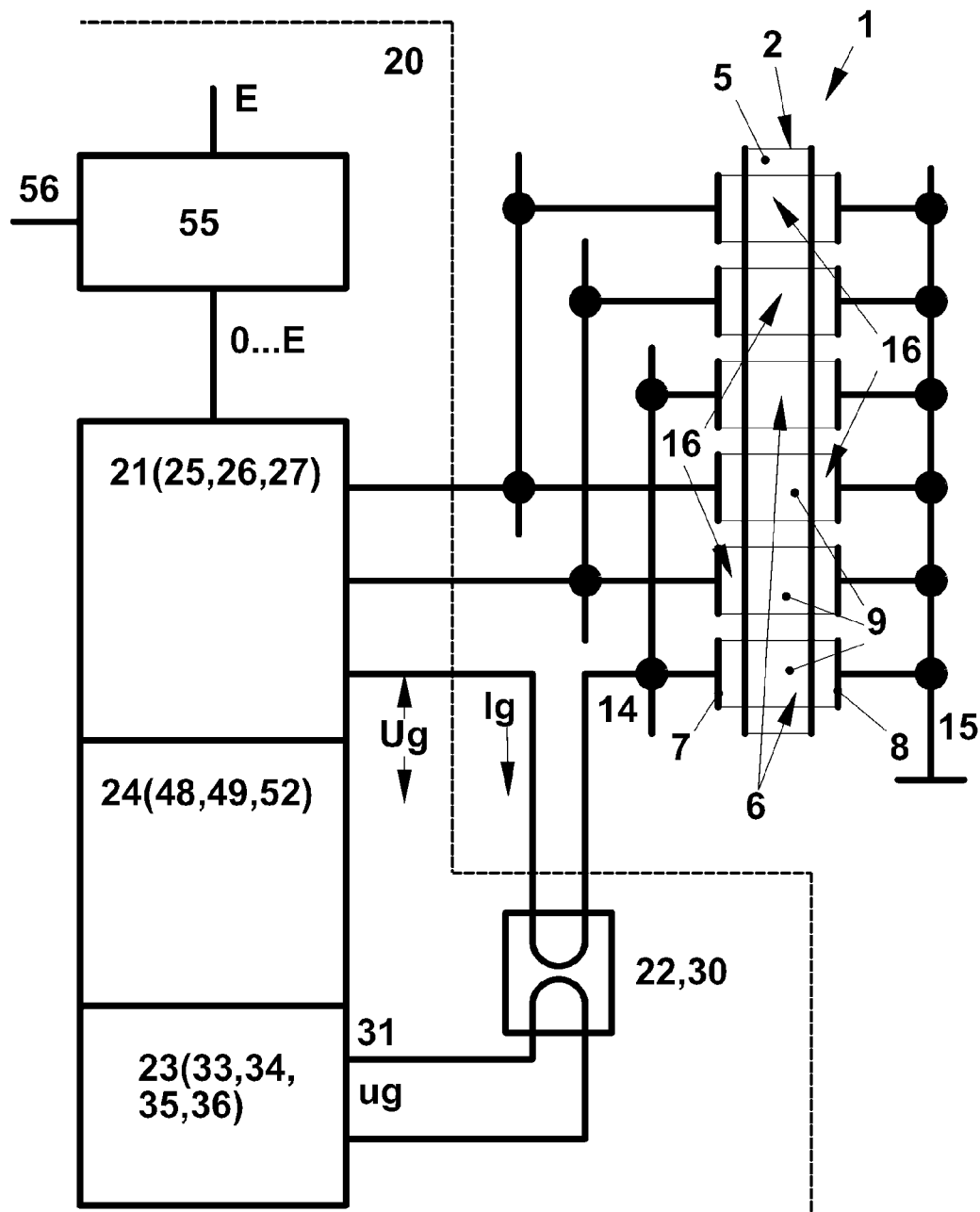


Fig.15

[Fig.]

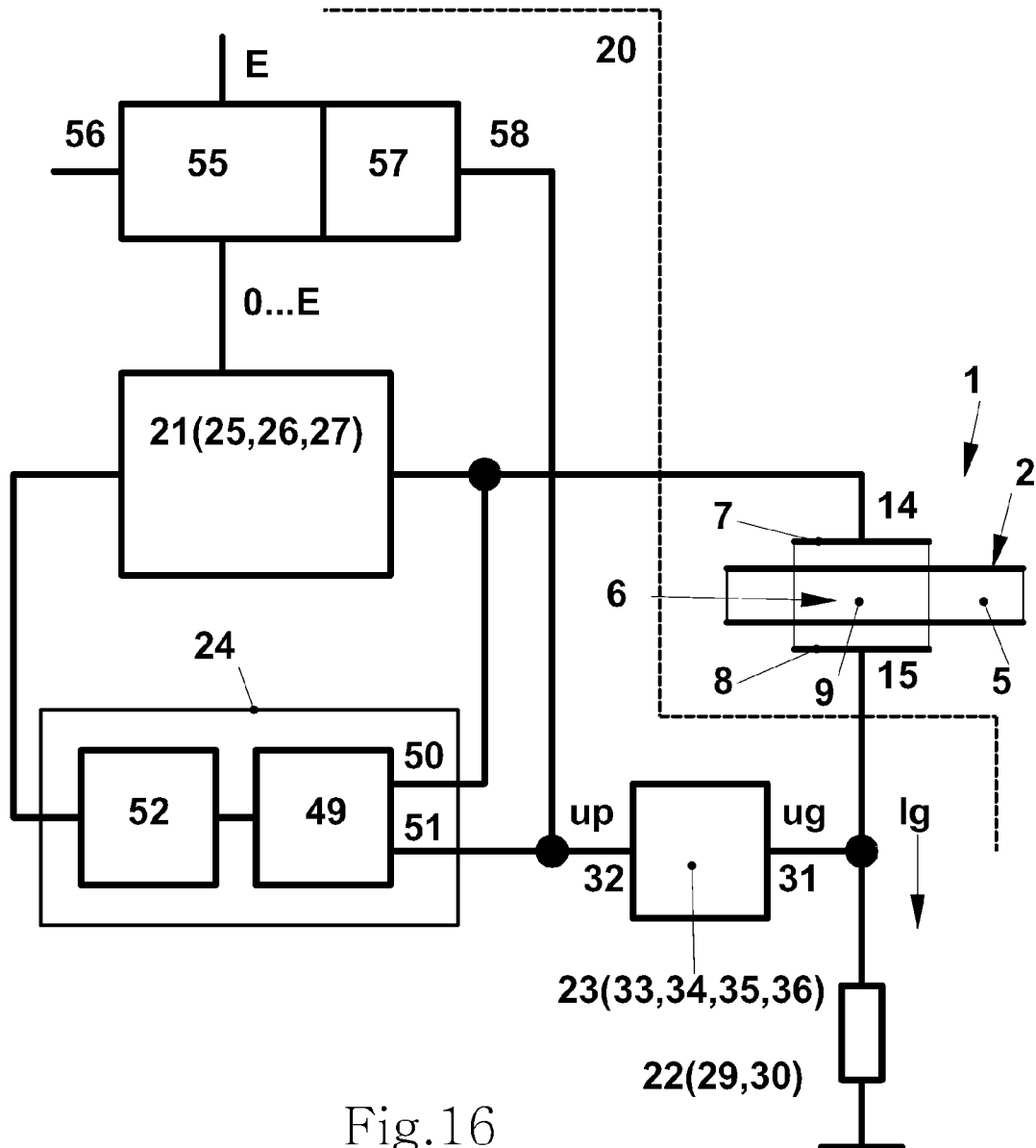


Fig.16

