(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) Veröffentlichungsnummer: **0 254 237 B1**

(12) # EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag der Patentschrift: **21.09.94**

(51) Int. Cl.[5]: **B06B 1/02**

(21) Anmeldenummer: **87110425.3**

(22) Anmeldetag: **18.07.87**

Die Akte enthält technische Angaben, die nach dem Eingang der Anmeldung eingereicht wurden und die nicht in dieser Patentschrift enthalten sind.

(54) **Verfahren zur phasengesteuerten Leistungs- und Frequenzregelung eines Ultraschallwandlers sowie Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.**

(30) Priorität: **25.07.86 DE 3625149**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
27.01.88 Patentblatt 88/04

(45) Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
21.09.94 Patentblatt 94/38

(84) Benannte Vertragsstaaten:
BE CH DE FR GB IT LI NL SE

(56) Entgegenhaltungen:
DE-A- 3 317 045
DE-C- 3 401 735
US-A- 4 141 608
US-A- 4 551 690

(73) Patentinhaber: **Gässler, Herbert**
Rotweg 4
D-89160 Dornstadt (DE)

(72) Erfinder: **Gässler, Herbert**
Rotweg 4
D-89160 Dornstadt (DE)

(74) Vertreter: **Fay, Hermann, Dipl.-Phys. Dr.**
Postfach 17 67
D-89007 Ulm (DE)

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 0 254 237 B1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur phasengesteuerten Leistungs- und Frequenzregelung eines Ultraschallwandlers, der von dem frequenzveränderlichen Oszillator eines Phasenregelkreises mit durch eine Treiberstufe verstärkten Spannungspulsen gespeist wird, wobei zunächst die Frequenz des Oszillators zum Auffinden der Resonanz des Ultraschallwandlers von einem Wobbler zwangsgeführt variiert und der Wobbler nach Einrasten des Phasenregelkreises auf die Resonanzfrequenz des Wandlers gesperrt wird. Weiter betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens.

Aus der DE-PS 34 01 735 ist bereits eine Vorrichtung bekannt, die eine Durchführung des oben genannten Verfahrens ermöglicht. Diese Vorrichtung hat sich in der Praxis bewährt, zumal sie zahlreiche der früher beim Betrieb von Ultraschallwandlern bestandenen Probleme und Schwierigkeiten beseitigt hat. Bekanntlich muß bei der Verwendung von Ultraschallwandlern zur Flüssigkeitszerstäubung oder zu Schweißzwecken der die Anregungsfrequenz für den Wandler liefernde Oszillator sich auf zahlreiche sich ändernde Betriebseigenschaften des piezoelektrischen oder magnetostriktiven Wandlers einstellen können. So können zunächst Änderungen der Resonanzfrequenz des Wandlers auftreten, die von der Last am Wandler, von der Temperatur, sowie dem Alterungsgrad der Piezokeramik bzw. des magnetostriktiven Materials abhängig sind. Ferner treten Impedanzänderungen des Wandlers auf, die eine Abhängigkeit von der Frequenz, der Last, der Amplitude sowie der Temperatur zeigen. Diese Impedanzänderungen können darüber hinaus von den spezifischen Eigenschaften des Wandlerwerkstoffes, insbes. der physikalischen Eigenschaften der Piezoscheiben verursacht sein. Schließlich teten auch noch Änderungen des Phasenwinkels zwischen Strom und Spannung um Wandler auf, die ebenfalls von der Anregungsfrequenz, der Last, der Amplitude sowie der Temperatur abhängig sind. Diese genannten Erscheinungen treten in der praktischen Anwendung gemeinsam auf, so daß sich der Oszillator auf die sich daraus ergebenden Änderungen der Betriebsbedingungen einstellen können muß. Bei der Vorrichtung aus der DE-PS 34 01 735 gelingt dies insbes. durch die Verwendung eines Phasenregelkreises bereits weitgehend. Schwierigkeiten bereitet jedoch nach wie vor das Anschwingen des Wandlers unter großer Bedämpfung, wenn sich also beispielsweise ein restlicher Flüssigkeitstropfen auf dem Wandler befindet oder bereits vor dem Anschwingen nicht zerstäubte Flüssigkeit an dem Wandler entlang strömt. Dann reicht nämlich häufig die zur Verfügung stehende Anregungsenergie nicht aus, um den Wandler anschwingen zu lassen. Eine generelle Erhöhung der Anregungsleistung hätte dagegen den Nachteil eines unwirtschaftlichen Betriebs und würde die Gefahr einer Überlastung des Wandlers in sich bergen. Im übrigen bestimmt die von der Wandlerleistung beeinflußte Schwingungsamplitude auch die Tröpfchengröße, die sich in der Regel aus dem Anwendungszweck bestimmt, so daß schon aus diesem Grund der freien Variation der Anregungsleistung Grenzen gesetzt sind. Schließlich ist auch auf einen Betrieb des Ultraschallwandlers mit konstanter Schwingungsamplitude zu achten, um bei der Flüssigkeitszerstäubung ein gleichmäßiges Tröpfchenspektrum zu erhalten.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs genannten Art so zu verbessern, daß ein Anschwingen des Wandlers auch bei hoher Anfangsbedämpfung sicher gewährleistet ist und auch bei starken Bedämpfungsänderungen ein Abreißen der Schwingung sicher vermieden wird.

Diese Aufgabe wird nach der Erfindung dadurch gelöst, daß nach dem Anschwingen des Ultraschallwandlers im Bereich seiner Serienresonanzfrequenz ein kapazitiver Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung im Wandler eingestellt und betriebsmäßig aufrecht erhalten wird, so daß durch die Phasenregelung des Phasenregelkreises die Betriebsfrequenz des Oszillators gegenüber der Serienresonanzfrequenz des Wandlers verringert wird, wobei eine Änderung des Phasenwinkels infolge einer mechanischen Belastung des Wandlers zu einer Erhöhung der Betriebsfrequenz des Oszillators und damit zu einer Verschiebung in Richtung zur Serienresonanzfrequenz des Wandlers führt.

Der durch die Erfindung erreichte Fortschritt besteht im wesentlichen darin, daß der Ultraschallwandler im Gegensatz zu dem bisher bekannten Verfahren nicht in Resonanz, sondern knapp unterhalb seiner Resonanzfrequenz in einer quasi-erzwungenen Schwingung betrieben wird. Dies bedingt zwar, wegen der deutlich höheren Wandlerimpedanz außerhalb der Resonanzfrequenz, eine höhere Wandlerspannung als sie bei Betrieb in Resonanz nötig wäre, dafür kann jedoch wegen der starken Impedanzänderung im Bereich der Resonanzfrequenz schon durch geringere Frequenzänderungen die Anregungsleistung im Wandler wesentlich erhöht werden. Da ferner in der Nähe der Resonanzfrequenz des Wandlers die Phasensteilheit der Phasenwinkeländerung zwischen Strom und Spannung im Wandler in Abhängigkeit von der Frequenz sehr groß ist, führen durch die Bedämpfung des Wandlers verursachte Phasenwinkeländerungen zu einer Frequenzänderung in Richtung zur Resonanzfrequenz, die dann die beschriebene Erhöhung der Wandlerleistung zur Folge hat. Auf

diese Weise ist das Verfahren hervorragend geeignet, dem Wandler für alle Betriebsfälle automatisch die zum optimalen Zerstäuben notwendige Leistung zuzuführen. Dadurch wird insbes. auch ein Abreißen der Schwingung bei zu großem Flüssigkeitsdurchsatz verhindert, darüber hinaus stellt sich die Wandlerleistung auch verschiedenen Flüssigkeitsdichten und Viskositäten der zu zerstäubenden Flüssigkeiten entsprechend ein.

Der kapazitive Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung im Wandler liegt dabei vorzugsweise im Bereich zwischen -30 ° ind -85 ° .

Weiter empfiehlt es sich im Rahmen der Erfindung, daß die Phasensteilheit in dem unterhalb der Serienresonanzfrequenz liegenden Frequenzbereich durch eine Zusatzimpedanz im Wandlerkreis so eingestellt ist, daß die über die sinkende Wandlerimpedanz bei Verschiebung der Betriebsfrequenz hin zur Serienresonanzfrequenz ansteigende Wandlerleistung die Bedämpfung des Wandlers im wesentlichen kompensiert. Dadurch wird dem Wandler in jedem seiner Betriebszustände gerade etwa die hierfür erforderliche Leistung zugeführt.

Da wegen des angestrebten hohen Wirkungsgrades die Anregung des Wandlers pulsförmig erfolgt, der Wandler jedoch anschließend mit seiner demgegenüber abweichenden Eigenfrequenz weiterschwingen würde, empfiehlt es sich, daß dem Wandler pro Schwingungsperiode zwei Spannungsimpulse jeweils entgegen gesetzter Polarität zugeführt werden, die zeitlich um die halbe Schwingungsdauer gegeneinander versetzt sind. Dadurch wird verhindert, daß die Phasenregelschleife insbes. bei größerer Abweichung zwischen Eigenresonanz des Wandlers und Anregungsfrequenz ausrastet.

Um die Eigenschwingung des Wandlers andererseits nicht zu stark zu stören, empfiehlt es sich, daß die Dauer der Spannungspulse kleiner ist als ein Viertel der Periodendauer der Wandlerschwingung. Um eine unsymmetrische Schwingungsform zu vermeiden, empfiehlt es sich weiter, daß die Dauer der beiden Spannungspulse pro Schwingungsperiode durch Integration miteinander verglichen werden und die Dauer zumindest eines der beiden Spannungspulse auf Gleichheit der Beiden Spannungspulse geregelt wird.

Um ein schnelles und sicheres Einrasten der Phasenregelschleife zu erreichen, ist es weiter zweckmäßig, wenn der zum Auffinden der Resonanzfrequenz vorgesehene Wobbler bei einer unterhalb der Resonanzfrequenz des Wandlers liegenden Frequenz anläuft. Um dabei das sichere Einrasten des Phasenregelkreises zu erreichen, sollte sich der Wobbelvorgang etwa über $5 \cdot 10^3$ Periodendauern der Resonanzfrequenzschwingung erstrecken. Weiter empfiehlt es sich, daß der Wobbelbereich auf einen keine weiteren Nebenresonanzen des Wandlers aufweisenden Frequenzbereich beschränkt ist, so daß sichergestellt ist, daß der Phasenregelkreis allein auf die Serienresonanzfrequenz des Wandlers einrasten kann.

Weiter betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens, insbes. zum Betrieb eines piezoelektrischen Ultraschallwandlers, mit einem von einem Phasenregelkreis gesteuerten Oszillator zur Erzeugung, einer Treiberstufe zur Verstärkung und einem Transformator zur Übertragung der Anregungspulse für den Wandler, wobei das zur Beeinflussung des Phasenregelkreises benötigte Synchronisationssignal an einer Wicklung des Transformators abgegriffen wird, sowie mit einem Wobbler, der zunächst zum Auffinden der Resonanzfrequenz des Wandlers die Oszillatorfrequenz zwangsgeführt variiert und nach Einrasten des Phasenregelkreises auf die Resonanzfrequenz gesperrt wird.

Vorrichtungsmäßig wird die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe dadurch gelöst, daß dem Phasendetektor des Phasenregelkreises ein einstellbares Phasendrehglied vorgeschaltet ist, dessen Phasendrehwinkel so eingestellt ist, daß bei eingerastetem Phasenregelkreis ein kapazitiver Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung im Wandler aufrecht erhalten wird. Um bei einer Belastungserhöhung des Wandlers eine angepaßte Leistungserhöhung zu erreichen, ist im Wandlerkreis zweckmäßigerweise eine Zusatzimpedanz vorgesehen, die die frequenzabhängige Phasensteilheit unterhalb der Serienresonanzfrequenz des Wandlers verringert. Diese Zusatzimpedanz ist in bevorzugter Ausführungsform von einem dem Wandler parallel geschalteten Kondensator gebildet. Eine besonders zweckmäßige Anpassung ergibt sich dabei dann, wenn der die Zusatzimpedanz bildende Kondensator und die übrigen, nicht durch den Wandler bedingten Kapazitäten jeweils etwa ein Drittel der niederfrequent gemessenen Grundkapazität des Wandlers betragen. In weiter bevorzugter Ausführungsform der Erfindung ist dann die Induktivität der Sekundärwicklung des Transformators nach der Thompson-Formel unter Berücksichtigung aller Kapazitäten des Wandlerkreises und einer um etwa einen Faktor von 1,3 höheren Frequenz als der Wandlerserienresonanzfrequenz bemessen.

Um trotz der erzwungenen Schwingung eine gleichmäßige Anregung zu erreichen und ein Ausrasten des Phasenregelkreises zu verhindern, ist die Treiberstufe zweckmäßigerweise als Gegentakttreiber ausgebildet, so daß während jeder Schwingungsperiode dem Wandler jeweils zwei Spannungspulse entgegen gesetzter Polyarität zugeführt werden. Dabei ist der Treiberstufe zweckmäßigerweise eine Symmetriestufe vorgeschaltet, die die beiden Spannungspulse des Gegentakttreibers integriert und durch einen Komparator miteinander

vergleicht, der bei Unsymmetrie den Arbeitspunkt eines der Gegentakttreiber verstellt.

Um eine noch weiterreichende Anpassung der Anregungsleistung zu erzielen, kann die Betriebsspannung der Treiberstufe durch den Wobbler und/oder das Rastsignal des Phasenregelkreises veränderlich einstellbar sein. Schließlich kann es sich auch zur Erzielung eines besonders günstigen Wirkungsgrades empfehlen, daß die Regelung der Betriebsspannung durch eine getaktete Stromversorgung erfolgt, wobei deren Taktfrequenz der Oszillatorfrequenz des Phasenregelkreises entspricht. Dadurch können sonst von getakteten Stromversorgungen hervorgerufene Störungen im Phasenregelkreis weitgehend vermieden werden.

Im folgenden wird die Erfindung an einem in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiel näher erläutert; es zeigen:

- Fig. 1 eine Vorrichtung nach der Erfindung in einem schematischen Blockschaltbild,
- Fig. 2 den Frequenzgang und die Phasenlage eines Ultraschallwandlers im Resonanzbereich, wobei die Teilfigur 2b im wesentlichen der Teilfigur 2a entspricht und Fig. 2c die Dämpfung und Phasenlage bei dem Wandler parallelgeschaltetem LC-Glied zeigt,
- Fig. 3 in den Teilfiguren a) und b) ein Vektordiagramm für einen Ultraschallwandler bei geringer bzw. bei hoher Belastung für den in Teilfigur c) dargestellten Sekundärkreis.

Die in Fig. 1 der Zeichnung dargestellte Schaltungsanordnung dient insbes. zum Betrieb eines piezoelektrischen Ultraschallwandlers 1. Zur Erzeugung der Anregungsfrequenz ist ein von einem üblichen Phasenregelkreis 2 gesteuerter, in der Zeichnung nicht im einzelnen dargestellter Oszillator vorgesehen, dessen Ausgangsfrequenz von einer Treiberstufe 3, 4 verstärkt wird, die über einen Transformator 5 den Wandler 1 speist. Das zur Beeinflussung des Phasenregelkreises 2 benötigte Synchronisationssignal wird an einer Wicklung 6 des Transformators 5 abgegriffen. Ferner ist ein Wobbler 7 vorgesehen, der zunächst zum Auffinden der in Fig. 2 mit 1.1 bezeichneten Serienresonanzfrequenz des Wandlers 1 die Oszillatorfrequenz zwangsgeführt variiert und nach Einrasten des Phasenregelkreises 2 auf die Resonanzfrequenz gesperrt wird.

Dem Phasendetektor des Phasenregelkreises 2 ist ein einstellbares Phasendrehglied 8 vorgeschaltet, das eine Phasenverschiebung des Synchronisationssignals vornimmt. Dabei ist dessen Phasenwinkel so eingestellt, daß bei eingerastetem Phasenregelkreis 2 ein kapazitiver Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung im Wandler besteht. Um diese Phasenbedingung aufrecht erhalten zu können, muß der Phasenregelkreis 2, wie sich aus dem einander zugeordneten Phasen- und Impedanzverlauf in Fig.2a ergibt, die Anregungsfrequenz verringern, so daß der Wandler in einer quasi erzwungenen Schwingung unterhalb seiner Resonanzfrequenz betrieben wird. Wie sich dabei der Fig. 2a weiter entnehmen läßt, führen bereits geringe Veränderungen der Phasenlage zu einer ebenfalls verhältnismäßig geringen Frequenzänderung, die allerdings dann eine relativ starke Änderung der Wandlerimpedanz zur Folge hat. Wenn daher durch eine stärkere Bedämpfung des Wandlers 1, wie dies in Fig. 3a gezeigt ist, der Phasenwinkel im Wandler 1 eine geringfügige Verschiebung erfährt, so hat dies eine Frequenzerhöhung zur Folge, die eine Verringerung der Wandlerimpedanz und damit eine Erhöhung der zugeführten Leistung nach sich zieht. Im übringen ist in Fig. 3 mit I_L der Strom durch die Sekundärwicklung 5.1 des Transformators 5, mit I_C der Strom durch eine im folgenden noch zu beschreibende Zusatzimpedanz 9, mit I_W der Wandlerstrom und mit U die Spannung am Wandler 1 bezeichnet. Der Phasenwinkel ϕ gibt die Phasenbeziehung zwischen dem Gesamtstrom I_{ges} und der Spannung U an, wobei die sich bei Belastung des Wandlers 1 einstellende Phasenwinkeländerung $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ von dem Phasenregelkreis ausgewertet wird.

Um bei einer Erhöhung der Wandlerbelastung die richtige Nachregelung der Leistung zu erreichen, ist es erforderlich, die Phasensteilheit im Bereich unterhalb der Serienresonanzfrequenz des Wandlers entsprechend einzustellen. Hierzu ist im Wandlerkreis eine von einem dem Wandler 1 parallel geschalteten Kondensator gebildete Zusatzimpedanz 9 vorgesehen, die die Phasensteilheit des Wandlers 1 verringert. Sowohl der die Zusatzimpedanz 9 bildende Kondensator als auch die übrigen, nicht durch den Wandler 1 bedingten Kapazitäten wie etwa auch die Kabelkapazität sind dabei so bemessen, daß sie jeweils etwa ein Drittel der niederfrequent gemessenen Grundkapazität des Wandlers 1 betragen. Die Induktivität der Sekundärwicklung 5.1 des Transformators 5 bestimmt sich dann nach der Thompson-Formel unter Berücksichtigung aller Kapazitäten des Wandlerkreises und unter Zugrundelegung einer um etwa einen Faktor von 1,3 höheren Frequenz als der Wandlerserienresonanzfrequenz.

In Fig. 2c ist der einander zugeordnete Phasen- und Impedanzverlauf gezeigt, wenn die elektrische Resonanzfrequenz infolge eines zum Wandler parallel geschalteten LC-Gliedes zu tieferen Frequenzen hin verschoben ist, also unterhalb der - lagemäßig unveränderten - mechanischen Resonanzfrequenz zu liegen kommt. In diesem Fall muß dafür gesorgt werden, daß die elektrische von der

mechanischen Resonanzfrequenz so weit entfernt liegt, daß der kapazitive Zweig wiederum die nötige Steilheit aufweist.

Die Treiberstufe 3, 4 ist im einzelnen als Gegentakttreiber ausgebildet, wodurch der Wandler 1 während jeder Halbperiode einen Anregungspuls erhält. Dadurch ist sichergestellt, daß der außerhalb der Anregungspulse frei schwingende, im übrigen in erzwungener Schwingung betriebene Wandler 1 nicht soweit aus der Anregungsfrequenz laufen kann, daß ein Ausrasten des Phasenregelkreises 2 zu befürchten wäre. Um eine möglichst unverzerrte Schwingungsform des Wandlers 1 zu erhalten, die auch im Hinblick auf ein gleichmäßiges Tröpfchenspektrum wünschenswert ist, ist der Treiberstufe 3, 4 eine Symmetrierstufe 10 vorgeschaltet, die die beiden Spannungspulse des Gegentakttreibers integriert und durch einen Komparator miteinander vergleicht. Bei einer Unsymmetrie der beiden Spannungspulse wird dann der Arbeitspunkt eines der beiden Gegentakttreiber durch die Symmetrierstufe entsprechend verstellt.

Um eine weitere Leistungsregelung zu erreichen, ist die Betriebsspannung des Spannungsreglers 11 für die Treiberstufe 3, 4 durch den Wobbler 7 bzw. gegebenenfalls auch durch das Rastsignal des Phasenregelkreises 2 veränderlich einstellbar, wie dies in der Zeichnung durch die Leitung 12 angedeutet ist. Zum Anschwingen kann daher der Spannungsregler 11 zunächst seine maximale Ausgangsspannung zur Verfügung stellen, die nach erfolgtem Anschwingen auf den vorgesehenen Betriebswert reduziert wird. Aber auch ohne diese zusätzliche Spannungsregelung erfolgt das Anschwingen des Wandlers 1 stets mit maximaler Leistung, da der Phasenregelkreis 2 zunächst auf der Serienresonanzfrequenz des Wandlers 1 einrastet, wo dieser seine minimale Impedanz besitzt und daher die maximal mögliche Leistung aufnimmt. Erst nach deem Anschwingen erfolgt dann über die Regelung der Phasenlage ein Absenken der Frequenz und infolge des dadurch bedingten Impedanzanstiegs eine Verringerung der Anregungsleistung.

Die Regelung der Betriebsspannung kann im übrigen durch eine getaktete Stromversorgung erfolgen, wobei deren Taktfrequenz vorteilhafterweise der Oszillatorfrequenz des Phasenregelkreises entspricht, so daß Störungen im Regelkreis vermieden werden. Für den Phasenregelkreis selbst ist dabei ein eigener Spannungsregler 13 vorgesehen.

Um eine Überlastung der Treiberstufe 3, 4 und/oder des Wandlers 1 zu vermeiden, ist ein Überlastschutz 14 vorgesehen, mit dessen Hilfe der primärseitige Strom durch den Transformator 5 überwacht und gegebenenfalls die Aussteuerung begrenzt wird.

Zur weiteren Verbesserung des Anschwingverhaltens kann die Flüssigkeitszufuhr zum Wandler 1 über ein durch ein Zeitglied 15 betätigtes Flüssigkeitsventil 16 verzögert erfolgen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur phasengesteuerten Leistungs- und Frequenzregelung eines Ultraschallwandlers, der von dem frequenzveränderlichen Oszillator eines Phasenregelkreises mit durch eine Treiberstufe verstärkten Spannungspulsen gespeist wird, wobei zunächst die Frequenz des Oszillators zum Auffinden der Resonanz des Ultraschallwandlers von einem Wobbler zwangsgeführt variiert und der Wobbler nach Einrasten des Phasenregelkreises auf die Resonanzfrequenz des Wandlers gesperrt wird, dadurch gekennzeichnet, daß der Ultraschallwandler (1) zum Anschwingen zunächst auf seiner Serienresonanzfrequenz (1.1) angeregt und nach dem Anschwingen ein kapazitiver Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung im Wandler (1) eingestellt und betriebsmäßig aufrecht erhalten wird, so daß durch die Phasenregelung des Phasenregelkreises (2) die Betriebsfrequenz des Oszillators gegenüber der Serienresonanzfrequenz (1.1) des Wandlers (1) verringert wird, wobei eine Änderung des Phasenwinkels infolge einer mechanischen Belastung des Wandlers (1) zu einer Erhöhung der Betriebsfrequenz des Oszillators und damit zu einer Verschiebung in Richtung zur Serienresonanzfrequenz (1.1) des Wandlers führt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der kapazitive Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung im Wandler (1) im Bereich zwischen -30° und -85° liegt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Phasensteilheit in dem unterhalb der Serienresonanzfrequenz (1.1) liegenden Frequenzbereich durch eine Zusatzimpedanz (9) im Wandlerkreis so eingestellt ist, daß die über die sinkende Wandlerimpedanz bei Verschiebung der Betriebsfrequenz hin zur Serienresonanzfrequenz (1.1) ansteigende Wandlerleistung die Bedämpfung des Wandlers im wesentlichen kompensiert.

4. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß dem Wandler (1) pro Schwingungsperiode zwei Spannungspulse jeweils entgegengesetzter Polarität zugeführt werden, die zeitlich um die halbe Schwingungsdauer gegeneinander versetzt sind.

5. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Dauer der Spannungspulse kleiner ist als ein Viertel der Periodendauer der Wandlerschwingung.

6. Verfahren nach den Ansprüchen 4 und 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Dauer der beiden Spannungsimpulse pro Schwingungsperiode durch Integration miteinander verglichen wird und die Dauer zumindest eines der beiden Spannungspulse auf Gleichheit der beiden Spannungspulse geregelt wird.

7. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der zum Auffinden der Resonanzfrequenz (1.1) vorgesehene Wobbler (7) bei einer unterhalb der Resonanzfrequenz (1.1) des Wandlers (1) liegenden Frequenz anläuft.

8. Verfahren nach Anspruch 1 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Wobbelvorgang sich etwa über $5 \cdot 10^3$ Periodendauern der Resonanzfrequenzschwingung erstreckt.

9. Verfahren nach den Ansprüchen 1 und 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Wobbelbereich auf einen keine weiteren Nebenresonanzen des Wandlers (1) aufweisenden Frequenzbereich beschränkt ist.

10. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, insbes. zum Betrieb eines piezoelektrischen Ultraschallwandlers, mit einem von einem Phasenregelkreis (2) gesteuerten Oszillator zur Erzeugung, einer Treiberstufe (3, 4) zur Verstärkung und einem Transformator (5) zur Übertragung der Anregungspulse für den Wandler (1), wobei das zur Beeinflussung des Phasenregelkreises (2) benötigte Synchronisationssignal an einer Wicklung (6) des Transformators (5) abgegriffen wird, sowie mit einem Wobbler (7), der zunächst zum Auffinden der Resonanzfrequenz (1.1) des Wandlers (1) die Oszillatorfrequenz zwangsgeführt variiert und nach Einrasten des Phasenregelkreises (2) auf die Resonanzfrequenz (1.1) gesperrt wird, dadurch gekennzeichnet, daß dem Phasendetektor des Phasenregelkreises (2) ein einstellbares Phasendrehglied (8) vorgeschaltet ist, dessen Phasendrehwinkel so eingestellt ist, daß bei eingerastetem Phasenregelkreis (2) ein kapazitiver Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung im Wandler (1) aufrecht erhalten wird.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß im Wandlerkreis eine Zusatzimpedanz (9) vorgesehen ist, die die frequenzabhängige Phasensteilheit unterhalb der Serienresonanzfrequenz (1.1) des Wandlers (1) verringert.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Zusatzimpedanz (9) von einem dem Wandler (1) parallel geschalteten Kondensator gebildet ist.

13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß der die Zusatzimpedanz (9) bildende Kondensator und die übrigen, nicht durch den Wandler (1) bedingten Kapazitäten jeweils etwa ein Drittel der niederfrequent gemessenen Grundkapazität des Wandlers (1) betragen.

14. Vorrichtung nach den Ansprüchen 10 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Induktivität der Sekundärwicklung (5.1) des Transformators (5) nach der Thompson-Formel unter Berücksichtigung aller Kapazitäten des Wandlerkreises und einer um etwa einen Faktor von 1,3 höheren Frequenz als der Wandlerserienresonanzfrequenz (1.1) bemessen ist.

15. Vorrichtung nach den Ansprüchen 10 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Treiberstufe (3, 4) als Gegentakttreiber ausgebildet ist.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß der Treiberstufe (3, 4) eine Symmetrierstufe (10) vorgeschaltet ist, die die beiden Spannungspulse des Gegentakttreibers integriert und durch einen Komparator miteinander vergleicht, der bei Unsymmetrie den Arbeitspunkt eines der Gegentakttreiber verstellt.

17. Vorrichtung nach den Ansprüchen 10 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Betriebsspannung der Treiberstufe (3, 4) durch den Wobbler (7) und/oder das Rastsignal des Phasenregelkreises (2) veränderlich einstellbar ist.

18. Vorrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Regelung der Betriebsspannung der Treiberstufe (3, 4) durch eine getaktete Stromversorgung erfolgt, wobei deren Taktfrequenz der Oszillatorfrequenz des Phasenregelkreises (2) entspricht.

Claims

1. A process for the phase-controlled power and frequency regulation of an ultrasonic transducer which is fed by the variable-frequency oscillator of a phase-lock loop with voltage

pulses which are amplified by a driver stage, wherein firstly the frequency of the oscillator is positively varied by a sweep generator for finding the resonance of the ultrasonic transducer and the sweep generator is blocked after latching of the phase-lock loop on to the resonance frequency of the transducer, characterised in that the ultrasonic transducer (1) is firstly excited for oscillation build-up at its series resonance frequency (1.1) and after the oscillation build-up a capacitive phase angle is set between current and voltage in the transducer (1) and operationally maintained so that the operating frequency of the oscillator is reduced relative to the series resonance frequency (1.1) of the transducer (1) by the phase regulation of the phase-lock loop (2), wherein a change in the phase angle, as a result of a mechanical loading on the transducer (1), results in an increase in the operating frequency of the oscillator and thus in a displacement towards the series resonance frequency (1.1) of the transducer.

2. A process according to claim 1 characterised in that the capacitive phase angle between current and voltage in the transducer (1) is in the range of between -30 ° and -85 °.

3. A process according to claim 1 or claim 2 characterised in that the phase slope in the frequency range beneath the series resonance frequency (1.1) is so set by an additional impedance (9) in the transducer circuit that the transducer power which rises by way of the falling transducer impedance upon displacement of the operating frequency towards the series resonance frequency (1.1) substantially compensates for the attenuation of the transducer.

4. A process according to claim 1 to 3 characterised in that in each oscillation period the transducer (1) is supplied with two voltage pulses of respective opposite polarities, which are displaced relative to each other in respect of time by half the oscillation duration.

5. A process according to claim 1 to 4 characterised in that the duration of the voltage pulses is less than a quarter of the period duration of the transducer oscillation.

6. A process according to claim 4 and 5 characterised in that the duration of the two voltage pulses for each oscillation period is compared together by integration and the duration of at least one of the two voltage pulses is regulated to equality of the two voltage pulses.

7. A process according to claim 1 to 6 characterised in that the sweep generator (7) which is provided for finding the resonance frequency (1.1) starts at a frequency which is below the resonance frequency (1.1) of the transducer (1).

8. A process according to claim 1 or claim 8 characterised in that the sweep operation extends approximately over $5 \cdot 10^3$ period durations of the resonance frequency oscillation.

9. A process according to claim 1 and 7 or 8 characterised in that the sweep range is restricted to a frequency range which does not have any further subordinate resonances of the transducer (1).

10. Apparatus for carrying out the process according to claim 1 in particular for the operation of a piezoelectric ultrasonic transducer, having an oscillator controlled by a phase-lock loop (2) for producing the excitation pulses for the transducer (1), a driver stage (3, 4) for amplifying the excitation pulses, and a transformer (5) for transmitting the excitation pulses, wherein the synchronisation signal required for influencing the phase-lock loop (2) is taken off at a winding (6) of the transformer (5), and having a sweep generator (7) which initially positively varies the oscillator frequency for finding the resonance frequency (1.1) of the transducer (1) and which is blocked after latching of the phase-lock loop (2) on to the resonance frequency (1.1), characterised in that connected upstream of the phase detector of the phase-lock loop (2) is an adjustable phase rotation member (8) whose angle of phase rotation is so set that with the phase-lock loop (2) latched a capacitive phase angle is maintained between current and voltage in the transducer (1).

11. Apparatus according to claim 10 characterised in that provided in the transducer circuit is an additional impedance (9) which reduces the frequency-dependent phase slope below the series resonance frequency (1.1) of the transducer (1).

12. Apparatus according to claim 11 characterised in that the additional impedance (9) is formed by a capacitor which is connected in parallel with the transducer (1).

13. Apparatus according to claim 12 characterised in that the capacitor forming the additional impedance (9) and the other capacitances which are not caused by the transducer (1) are respectively approximately one third of the basic capacitance, as measured at low frequency, of the transducer (1).

14. Apparatus according to claims 10 to 13 characterised in that the inductance of the secondary winding (5.1) of the transformer (5) is rated in accordance with the Thomson formula having regard to all capacitances of the transducer circuit and a frequency which is higher by about a factor of 1.3, than the transducer series resonance frequency (1.1).

15. Apparatus according to claims 10 to 14 characterised in that the driver stage (3,4) is in the form of a push-pull driver.

16. Apparatus according to claim 15 characterised in that connected upstream of the driver stage (3, 4) is a symmetry stage (10) which integrates the two voltage pulses of the push-pull driver and compares them together by a comparator which in the event of asymmetry adjusts the working point of one of the push-pull drivers.

17. Apparatus according to claim 10 to 16 characterised in that the operating voltage of the driver stage (3, 4) is variably adjustable by the sweep generator (7) and/or the latch signal of the phase-lock loop (2).

18. Apparatus according to claim 17 characterised in that regulation of the operating voltage of the driver stage (3, 4) is effected by a clock-controlled current supply, the clock frequency thereof corresponding to the oscillator frequency of the phase-lock loop (2).

Revendications

1. Procédé d'ajustement de la puissance et de la fréquence, par commande de phase, d'un transducteur ultrasonore alimenté par l'oscillateur à fréquences variables d'un circuit régulateur de phase par des impulsions de tension amplifiées par un étage excitateur, la fréquence de l'oscillateur subissant une variation, dans un premier temps, par le guidage forcé d'un vobulateur pour détecter la fréquence de résonance du transducteur ultrasonore et le vobulateur étant verrouillé après ajustage de la fréquence du circuit régulateur de phase en fonction de la fréquence de résonance du transducteur, caractérisé en ce que le transducteur ultrasonore (1) est excité, dans un premier temps, à sa fréquence de la résonance série (1.1) pour assurer le démarrage et en ce que après ce démarrage, un angle de phase capacitif entre le courent et la tension du transducteur (1) est ajusté et maintenu en fonction des conditions de service de manière à réduire la fréquence de service de l'oscillateur par rapport à la fréquence de la résonance série (1.1) du transducteur (1) au le moyen du circuit régulateur de phase (2), toute modification de l'angle de phase à la suite d'une sollicitation mécanique du transducteur (1) provoquant une augmentation de la fréquence de service de l'oscillateur et, par conséquent, un décalage en direction de la fréquence de la résonance série (1.1) du transducteur.

2. Procédé selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'angle de phase capacitif entre le courant et la tension du transducteur (1) se situe dans une plage comprise entre -30° et -85°.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que le pente des phases est ajustée, dans la plage de fréquences située audessous de la fréquence de le résonance série (1.1), par une impédance complémentaire (9) de manière à ce que la réduction de l'impédance du transducteur lors du décalage de la fréquence de service vers la fréquence de la résonance série (1.1) produise une compensation sensible de l'amortissement du transducteur.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que deux impulsions de tension sont appliquées au transducteur (1) à chaque période d'oscillation, ces impulsions étant de polarités opposées et décalées par la moitié d'une durée d'oscillation l'une par rapport à l'autre.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que la durée des impulsions de tension est inférieure à un quart de la durée de la période des oscillations du transducteur.

6. Procédé selon les revendications 4 et 5, caractérisé en ce que la durée des deux impulsions de tension pour chaque période d'oscillation est comparée par intégration et que la durée d'au moins l'une des deux impulsion de tension est ajustée de manière à obtenir deux impulsions de tension identiques.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que le vobulateur (7) prévu pour détecter la fréquence de résonance (1.1) démarre à une fréquence située au-dessous de la fréquence de résonance (1.1) du transducteur (1).

8. Procédé selon la revendication 1 ou 7, caractérisé en ce que la vobulation peut s'effectuer pendant 5 x 10^3 durées de périodes de l'oscillation de la fréquence de résonance.

9. Procédé selon les revendications 1 et 7 ou 8, caractérisé en ce que la plage de vobulation est limitée à une plage de fréquence ne présentant aucune résonance complémentaire du transducteur (1).

10. Dispositif permettant de mettre en oeuvre le procédé selon la revendication 1, plus particulièrement pour faire fonctionner un transducteur ultrasonore piézo-électrique, comprenant un oscillateur commandé par un circuit régulateur de phase (2) pour générer les impulsions d'excitation du transducteur (1), un étage excitateur (3, 4) pour les amplifier et un transformateur (5) pour les transmettre, le signal de synchronisation requis pour agir sur le circuit régulateur de phase (2) étant fourni par l'un des enroulements du transformateur (5), ainsi qu'un vobulateur (7) faisant varier, dans un premier temps, la fréquence de l'oscillateur par guidage forcé pour détecter la fréquence de résonance (1.1) du transducteur (1) et étant verrouillé, dans un deuxième temps, après ajustage du circuit régulateur de phases (2) à la fréquence de résonance (1.1), caractérisé en ce qu'un déphaseur rotatif (8) réglable est monté en amont du détecteur de phases du circuit régulateur de phase (2) dont l'angle de phase est réglé de manière à maintenir un angle de phase capacitif entre le courant et la tension du transducteur (1) lorsque le circuit régulateur de phases (2) est ajusté.

11. dispositif selon la revendication 10, caractérisé en ce qu'une impédance complémentaire (9) est prévue dans le circuit du transducteur pour réduire la pente de phase en fonction des fréquences dans la plage située au-dessous de la fréquence de la résonance série (1.1) du transducteur (1).

12. Dispositif selon la revendication 11, caractérisé en ce que l'impédance complémentaire (9) est constituée par un condensateur monté en parallèle par rapport au transducteur (1).

13. Dispositif selon la revendication 12, caractérisé en ce que le condensateur constituant l'impédance complémentaire (9), ainsi que les autres capacités non conditionnées par le transducteur (1) sont dimensionnés de manière à correspondre à environ un tiers de la capacité de base du transducteur (1), cette valeur étant mesurée à basse fréquence.

14. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 10 à 13, caractérisé en ce que le coefficient d'induction de l'enroulement secondaire (5.1) du transformateur (5) est definie selon la formule Thomson en tenant compte de l'ensemble des capacités du circuit du transducteur sur la base d'une fréquence 1,3 fois supérieure à la fréquence de la résonance série (1.1) du transducteur.

15. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 10 à 14, caractérisé en ce que l'étage excitateur (3,4) est réalisé sous la forme d'un excitateur symétrique.

16. Dispositif selon la revendication 15, caractérisé en ce qu'un étage d'équilibrage (10) est monté en amont de l'étage excitateur (3,4) qui intègre les deux impulsions de tension de l'excitateur symétrique et les compare par un comparateur ajustant le point de travail de l'un des deux excitateurs asymétriques en cas d'asymétrie.

17. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 10 à 16, caractérisé en ce que la tension de service de l'étage excitateur (3, 4) peut subir des variations au moyen du vobulateur (7) et/ou du signal d'ajustage du circuit régulateur de phase (2).

18. Dispositif selon la revendication 17, caractérisé en ce que la régulation de la tension de service de l'étage excitateur (3, 4) est effectué par une alimentation rythmée dont la fréquence de rythme correspond à la fréquence de l'oscillateur du circuit régulateur de phase (2).

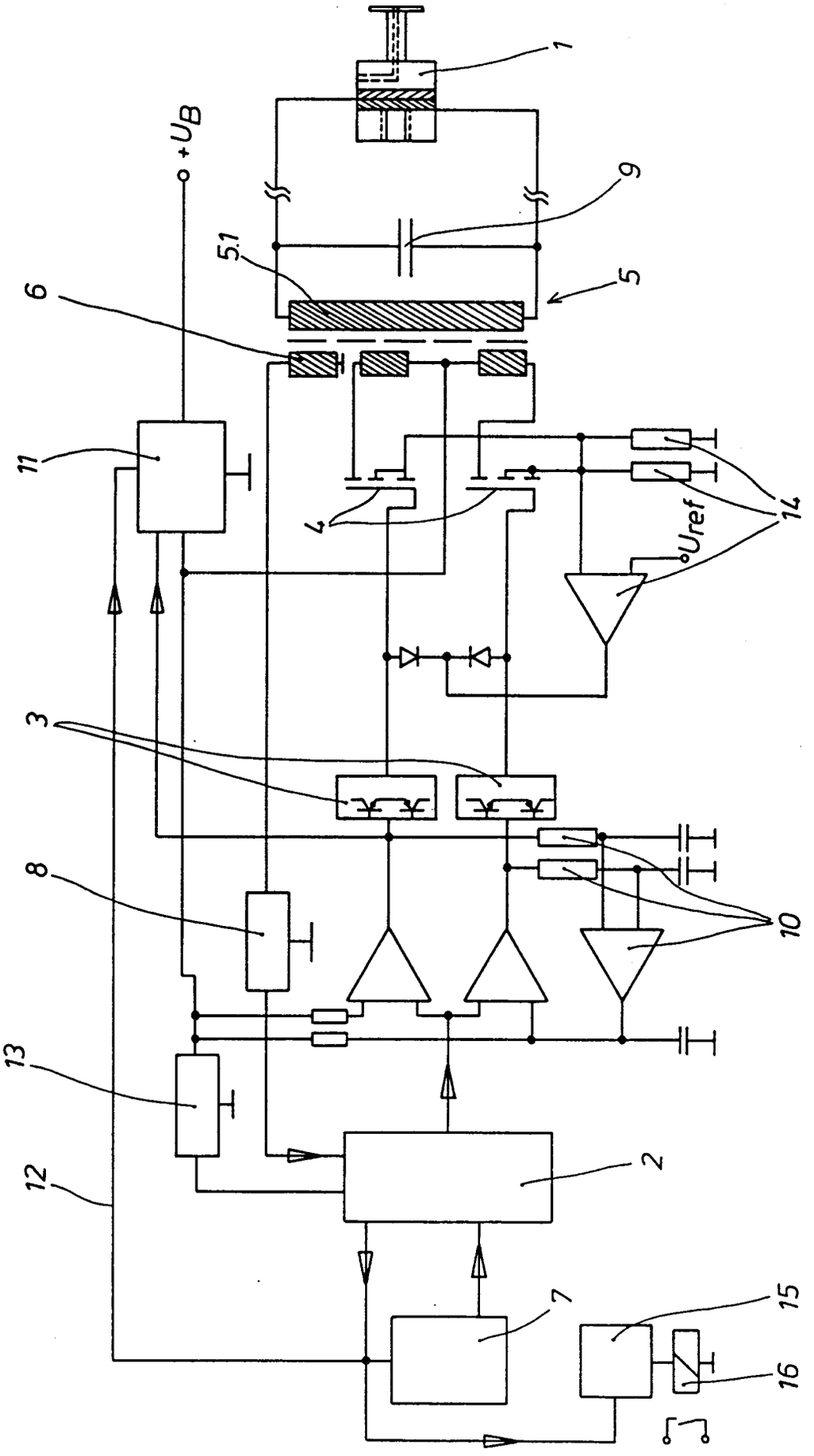


Fig. 1

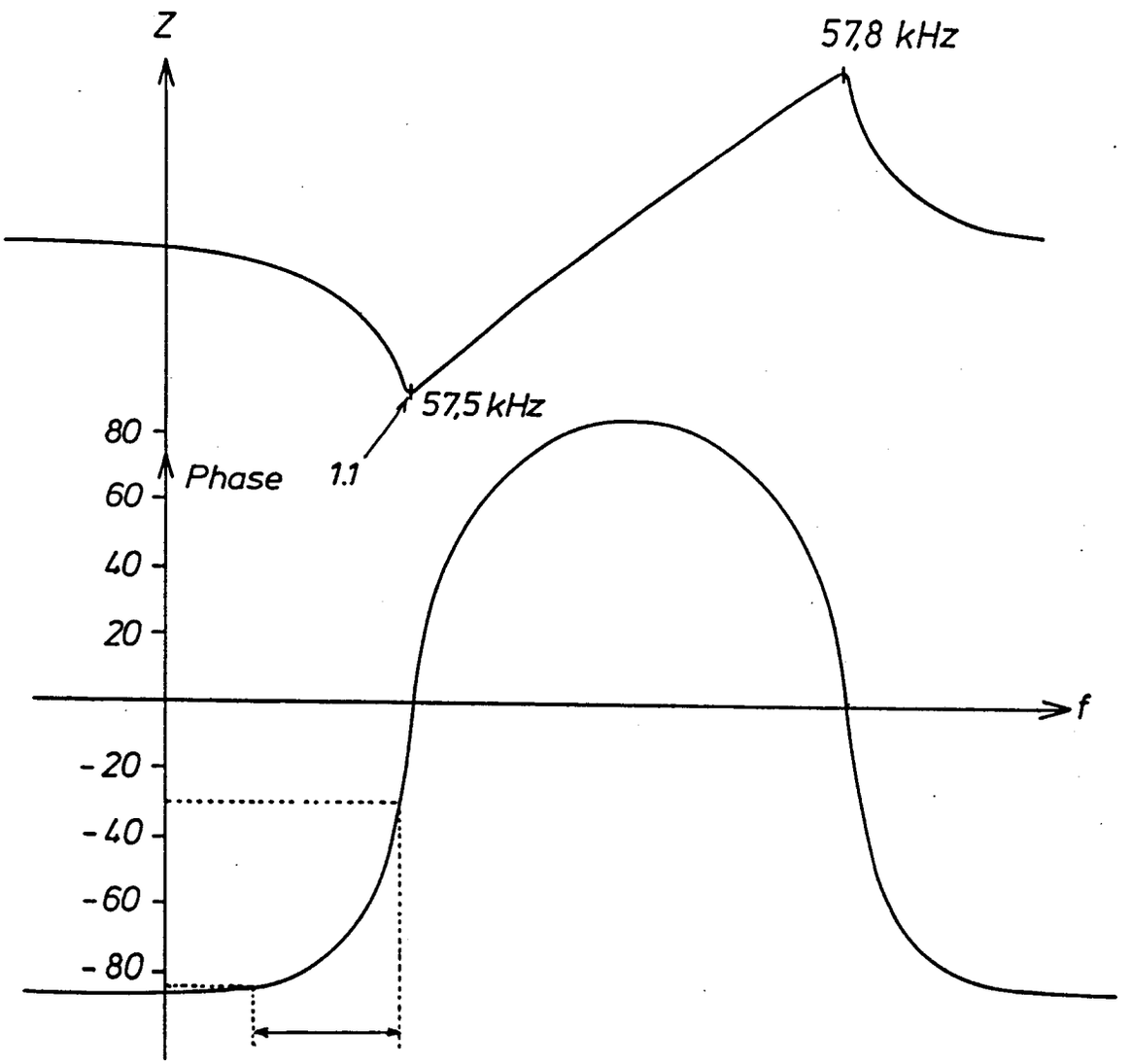


Fig. 2a

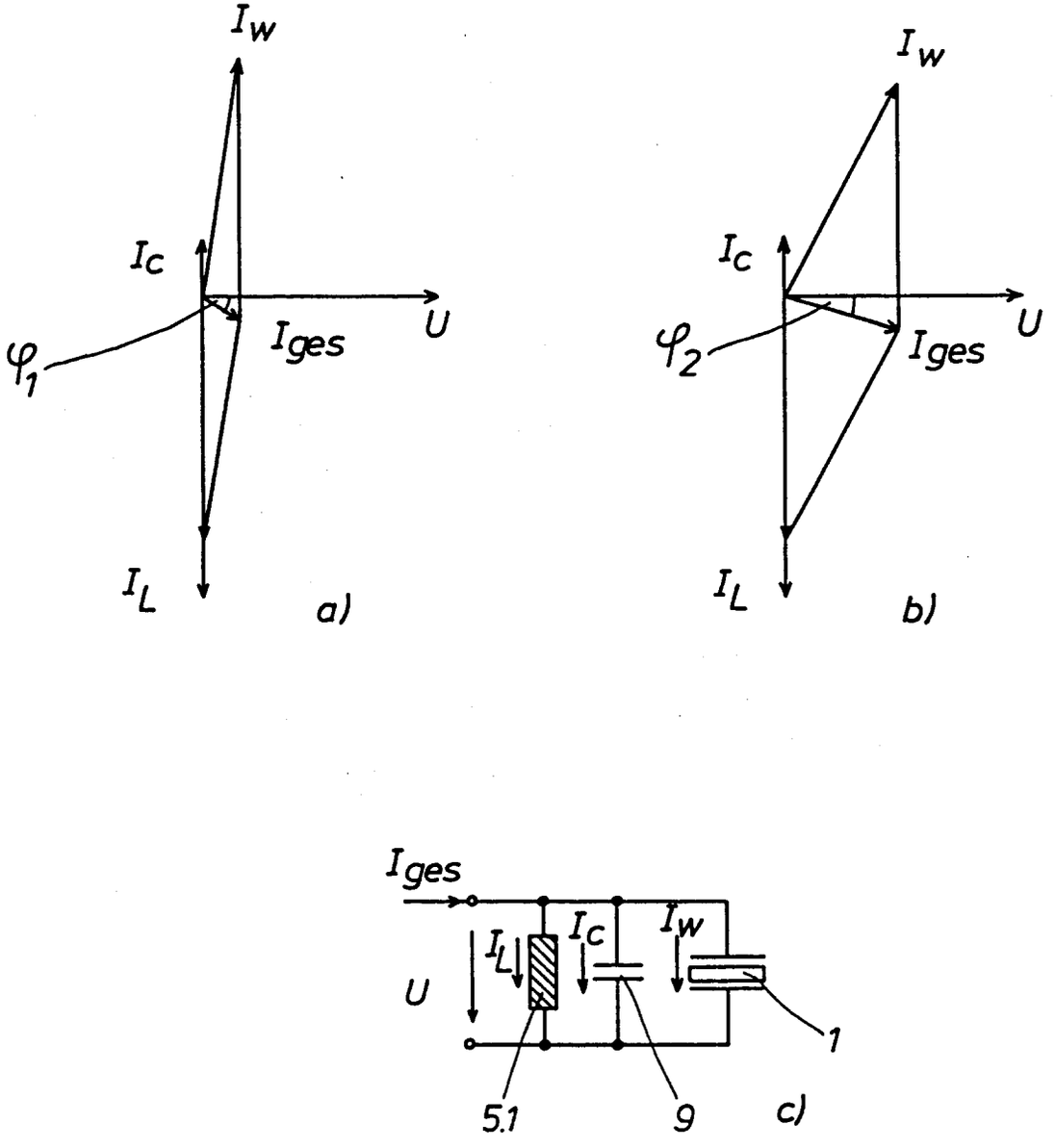

I_w
I_c
I_{ges}
U
φ_1
I_L
a)
I_w
I_c
φ_2
I_{ges}
U
I_L
b)
I_{ges}
I_L
I_c
I_w
U
1
5.1
9
c)

Fig. 3

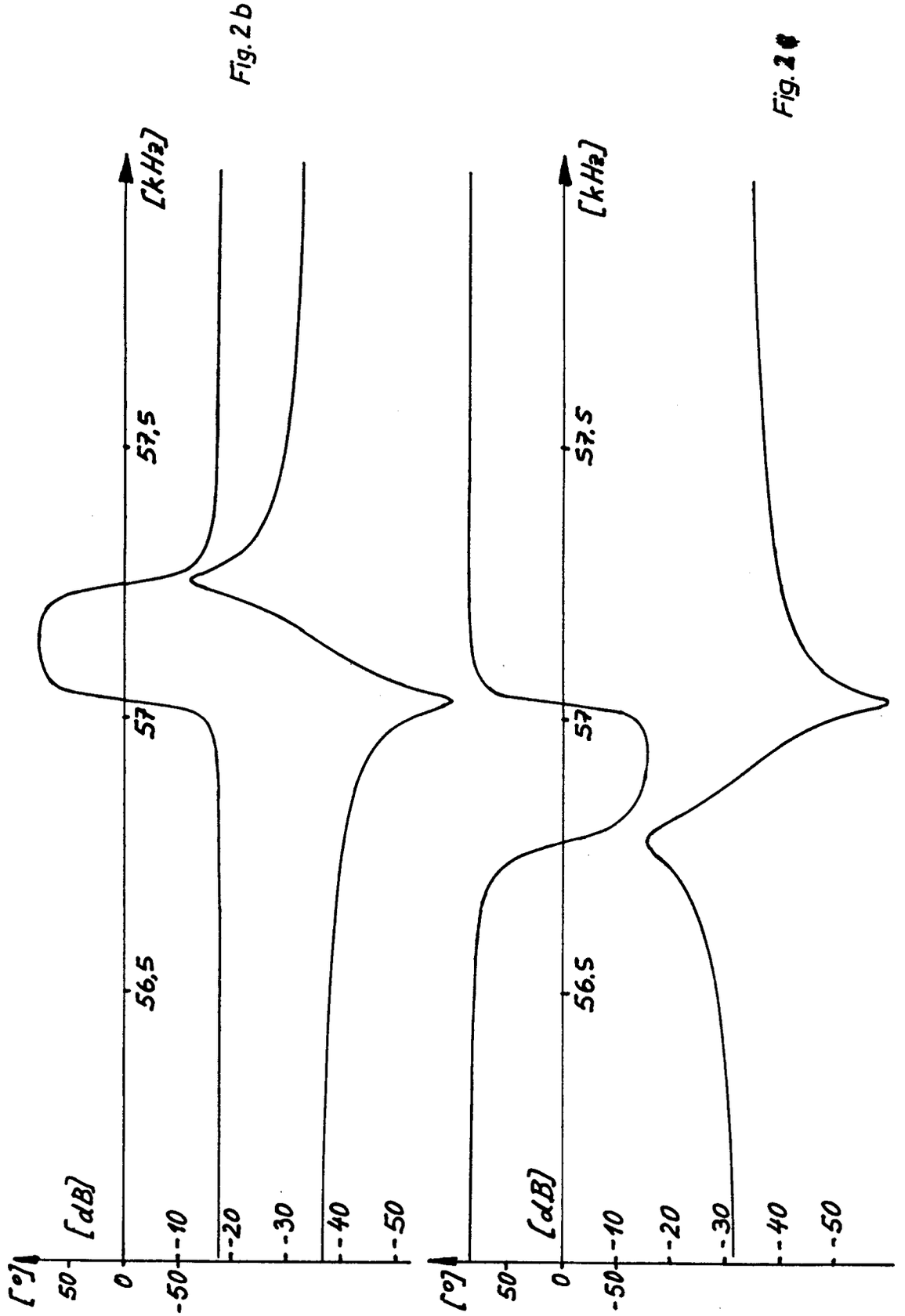

[°]
50
0
-50
[dB]
-10
-20
-30
-40
-50
56,5
57
57,5
[kHz]

Fig. 2 b

[°]
50
0
-50
[dB]
-10
-20
-30
-40
-50
56.5
57
57.5
[kHz]

Fig. 2