

SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 701 137 A2

(51) Int. Cl.: G01R 19/00 (2006.01)
G01R 17/10 (2006.01)

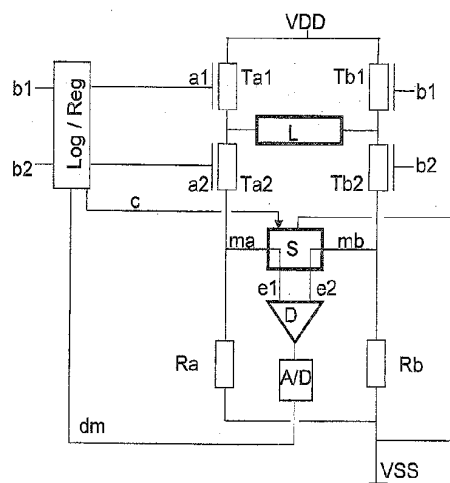
Patentanmeldung für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer:	00690/10	(71) Anmelder:	CTC Analytics AG, Industriestrasse 20 4222 Zwingen (CH)
(22) Anmeldedatum:	05.05.2010	(72) Erfinder:	Urs Probst, 3600 Zug (CH) Ladislav Kucera, 8800 Thalwil (CH)
(43) Anmeldung veröffentlicht:	30.11.2010	(74) Vertreter:	Keller & Partner Patentanwälte AG, Schmiedenplatz 5 Postfach 3000 Bern 7 (CH)
(30) Priorität:	22.05.2009 DE 102009022314.2		

(54) Verfahren und Schaltungsanordnung zur Messung des Stroms durch eine induktive Last.

(57) Die Erfindung sieht ein Verfahren und eine Schaltungsanordnung zur Messung des Stroms durch eine induktive Last L vor, wobei der Strom mit Hilfe einer Vollbrückenschaltung in die induktive Last L gespeist wird. Solche Vollbrückenschaltungen werden beispielsweise verwendet, um einen Strom pulsweitenmoduliert in eine Wicklung eines Gleichstrom-, Schritt- oder Tauchspulensmotors zu speisen. Es ist jeweils eine Messeinrichtung (Ra, Rb) für jede Halbbrücke vorgesehen. Dabei ist je eine Messeinrichtung (Ra, Rb) zwischen je einer Reihenschaltung von Schaltelementen und Masse (VSS) bzw. der Versorgungsspannung (VDD) angeordnet, an der jeweils eine Spannung abgegriffen wird, die ein Mass für den Strom durch die jeweilige Messeinrichtung ist. Die Einrichtung zur Messung der Ströme verfügt über mindestens eine Umschalteneinrichtung (S), mit der einer der beiden Eingänge (e1, e2) eines Differenzverstärkers (D) wahlweise mit Masse (VSS) bzw. mit der Versorgungsspannung (VDD) oder einer der beiden Messeinrichtungen verbunden werden kann.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Schaltungsanordnung zur Messung des Stroms durch eine induktive Last, wobei der Strom mit Hilfe einer Vollbrückenschaltung in die induktive Last gespeist wird. Solche Vollbrückenschaltungen werden beispielsweise verwendet, um einen Strompulsweitenmoduliert in eine Wicklung eines Gleichstrom-, Schritt- oder Tauchspulenmotors zu speisen.

[0002] Für die Regelung des Stroms in einer induktiven Last, wie sie ein Motor darstellt, wird eine Strommessung benötigt. Die Qualität der Strommessung ist massgeblich mitentscheidend für die erreichbare Regelbandbreite des Motorsystems, bestehend aus einer digitalen oder analogen Regelschaltung, der Leistungsbrücke und der induktiven Last, zum Beispiel eines Zwei-Phasen Schrittmotors. Eine gute Stromregelung wirkt sich auch direkt auf einen gegebenenfalls darüber liegenden Geschwindigkeits- und Positionsregler aus. Mit einer besseren Stromregelung sind höhere Regelsteifigkeiten erzielbar, die eine Verbesserung hinsichtlich der Führungsgenauigkeit, der Einschwingzeit und des Störverhaltens des Gesamtsystems zur Folge hat.

[0003] Die Qualität einer Strommessung kann u.a. mit Hilfe einiger Kriterien beurteilt werden, die untereinander teilweise abhängig sind. So sollte eine gute Strommessung ein möglichst gutes Signal zu Rausch Verhältnis aufweisen, eine möglichst geringe Phasendrehung und eine genügend hohe Bandbreite besitzen. Andererseits sollten keine Signalanteile über der Nyquist-Frequenz vorhanden sein, um das Abtasttheorem nicht zu verletzen. Die Nyquist-Frequenz ist dabei durch die Abtastfrequenz einer Sampling-Schaltung im Rahmen einer Analog-Digital-Wandlung der ursprünglich analogen Messgrösse in ein digital weiter zu verarbeitendes Signal definiert. Sie beträgt bekanntlich maximal die Hälfte der Abtastfrequenz der Sampling-Schaltung. Diese letzte Bedingung kann nur erfüllt werden, wenn das Messsignal spektral in geeigneter Weise begrenzt wird.

[0004] Bekannte Verfahren oder Schaltungsanordnungen zur Messung des Stroms erfüllen diese Kriterien nicht oder nur unzureichend, oder sie gehen mit einem hohen, kostentreibenden schaltungstechnischen Aufwand einher.

[0005] Bei diesen Verfahren erfolgt die Strommessung entweder direkt in der Zuleitung zur induktiven Last oder in einer der beiden Speisungsleitungen zur Brückenschaltung. Letzteres ist kostengünstiger und wird deshalb oft bevorzugt, hat aber zur Folge, dass das Signal zeitlich nicht kontinuierlich zur Verfügung steht, was in einigen Fällen nachteilig sein kann.

[0006] Die US 6 0160061 258 beschreibt eine Strommessung in der Zuleitung zur induktiven Last; dieses Verfahren wird unter Fachleuten auch «High-Side» Messung genannt. Das Messsignal steht kontinuierlich zur Verfügung. Da der Strom durch die Pulsweitenmodulation (PWM) in der induktiven Last stetig zu und abnimmt, wird versucht, den Strom genau zu dem Zeitpunkt, in dem er den theoretischen zeitlichen Mittelwert durchschreitet, zu messen und dann zu speichern. Die Strommessung erfolgt also zu diskreten Zeitpunkten. Allfällige Störungen, die während des Messzeitpunkts vorhanden sein können, z.B. durch das Schalten einer zweiten, unabhängigen Phase in der unmittelbaren Nachbarschaft, fliessen ebenso in das Messsignal ein. Eine nach dem Nyquist-Kriterium korrekte Filterung des Signals ist dann wegen des diskreten Charakters des Messsignals häufig nicht mehr möglich.

[0007] Die EP 1 531 544 A2 beschreibt eine Strommessung in der Speisungsleitung zur Brückenschaltung. Der Strom in der Induktivität ist hier nur zu gewissen Zeitpunkten überhaupt messbar, nämlich genau dann, wenn der Strom diagonal durch die Brückenschaltung fliesst. Zirkuliert der Strom innerhalb der Brücke, d.h. sind entweder die beiden oberen oder die beiden unteren Schalter geschlossen, dann fliesst kein Strom über den Messwiderstand und folglich ist auch keine Messung möglich. Je nach Schalterstellung der Brücke wird zudem der Strom mal positiv und mal negativ gemessen. Eine nach dem Nyquist-Kriterium korrekte Filterung des Signals ist auch hier nicht möglich.

[0008] Die US 4562 386 löst dieses Polaritätsproblem durch eine Demodulation bzw. Gleichrichtung. Das Stromsignal ist aber auch hier nur dann kontinuierlich vorhanden, wenn auf eine Rezirkulation innerhalb der Brücke - mit entweder zwei geschlossenen oberen oder unteren Schaltern - verzichtet wird.

[0009] Verletzungen des Nyquist-Kriteriums werden u.a. auch durch Unstetigkeitsstellen (Sprungstellen, Messsignal-sprünge) im Messsignal verursacht oder gefördert. Aus der DE 2 930 863 A1 ist beispielsweise ein Verfahren zur Laststromerfassung in einem Gleichstrom-Umkehrsteller und eine Schaltungsanordnung zur Durchführung des Verfahrens bekannt, mit dem bzw. der diese Probleme und das Polaritätsproblem vermieden werden sollen. Die hier angegebene Schaltungsanordnung ist jedoch mit drei Operationsverstärkern pro Vollbrücke recht aufwendig und damit kostspielig.

[0010] Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein möglichst leistungsfähiges und kostengünstig realisierbares Verfahren und eine möglichst leistungsfähige und kostengünstig realisierbare Schaltungsanordnung zur Messung des Stroms durch eine induktive Last, wobei der Strom mit Hilfe einer Vollbrückenschaltung in die induktive Last gespeist wird, anzugeben. Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren und Erzeugnis nach einem der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung bilden den Gegenstand untergeordneter Patentansprüche.

[0011] Die Erfindung sieht ein Verfahren und eine Schaltungsanordnung vor zur Messung des Stroms durch eine induktive Last, in welche der Strom mit Hilfe einer Vollbrückenschaltung gespeist wird. Die Vollbrückenschaltung ist mit zwei identischen Halbbrücken aufgebaut, die aus je zwei in Reihe geschalteten Schaltelementen besteht. Die induktive Last wird an die Mittelabgriffe der Halbbrücken angeschlossen. An zwei Messeinrichtungen wird jeweils eine Spannung abgegriffen, die ein Mass für den Strom durch die jeweilige Messeinrichtung ist. Dabei ist je eine Messeinrichtung zwischen je

einer Reihenschaltung von Schaltelementen und Masse oder der Versorgungsspannung angeordnet. Diese Spannungen werden einem Differenzverstärker zugeführt, dessen Eingänge jeweils mit einer der beiden Messeinrichtungen verbunden sind. Mit Hilfe einer Umschalteneinrichtung (S) wird einer der beiden Eingänge des Differenzverstärkers wahlweise mit Masse bzw. der Versorgungsspannung oder einer der beiden Messeinrichtungen verbunden.

[0012] Dabei soll die Formulierung «wahlweise mit Masse (VSS) bzw. mit der Versorgungsspannung (VDD) oder einer der beiden Messeinrichtungen verbunden werden kann» bedeuten, dass in dem Fall, in dem die Messeinrichtungen zwischen je einer Reihenschaltung von Schaltelementen und Masse (VSS) angeordnet sind, die Umschalteneinrichtung einen der beiden Eingänge des betroffenen Differenzverstärkers wahlweise mit Masse oder einer der beiden Messeinrichtungen verbinden kann, und dass in dem anderen Fall, in dem die Messeinrichtungen zwischen je einer Reihenschaltung von Schaltelementen und der Versorgungsspannung (VDD) angeordnet sind, die Umschalteneinrichtung einen der beiden Eingänge des betroffenen Differenzverstärkers wahlweise mit der Versorgungsspannung (VDD) oder einer der beiden Messeinrichtungen verbinden kann.

[0013] Unter einer Messeinrichtung soll im Zusammenhang mit der Beschreibung der vorliegenden Erfindung jede zur Messung eines Stroms geeignete Einrichtung verstanden werden, insbesondere ein Messwiderstand oder beispielsweise ein Hall-Element, also eine auf dem magnetischen Hall-Effekt beruhende Einrichtung zur Strommessung. Andere Messeinrichtungen sind nicht ausgeschlossen. Eine an einer Messeinrichtung gemessene Spannung ist im Sinne der vorliegenden Erfindung «ein Mass für den Strom», der gemessen werden soll, wenn der zu messende Strom sich aus dieser gemessenen Spannung aufgrund eines funktionalen Zusammenhangs eindeutig rekonstruieren lässt.

[0014] Unter einem Messwiderstand soll im Zusammenhang mit der Beschreibung der vorliegenden Erfindung ein elektrischer Widerstand verstanden werden, bei dem die an seinen Enden abgreifbare Spannung in - für die Zwecke der Messung im Rahmen der vorliegenden Erfindung - ausreichender Näherung ein Mass für -also beispielsweise proportional - zu dem durch den Widerstand fliessenden Strom ist. Die Proportionalitätskonstante ist mit ausreichender Genauigkeit bekannt und hängt möglicherweise noch von anderen Einflussgrössen, wie beispielsweise der Temperatur ab. Soweit diese Einflüsse im Rahmen der Messgenauigkeit relevant sind, werden sie als bekannt vorausgesetzt und entsprechend berücksichtigt.

[0015] Die Formulierung «mit einer der beiden Messeinrichtungen verbinden» bedeutet im Fall einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung, bei der die Messeinrichtungen Messwiderstände sind, dass der Eingang des Differenzverstärkers mit derjenigen Klemme des Messwiderstandes verbunden wird, die jeweils der an Masse (VSS) bzw. an die Versorgungsspannung (VDD) angeschlossenen Klemme gegenüberliegt.

[0016] Unter einem Differenzverstärker soll im Zusammenhang mit der Beschreibung der vorliegenden Erfindung jede elektrische Schaltung verstanden werden, die geeignet ist, zwei zeitlich veränderliche analoge Eingangssignale so zu verarbeiten, dass am Ausgang dieser Schaltung eines analoges Differenzsignal der beiden Eingangssignale zur Verfügung steht. Ein Differenzverstärker kann zudem eine Verstärkung sowie eine Filterwirkung aufweisen.

[0017] Unter einer Brückenschaltung oder Vollbrückenschaltung soll im Zusammenhang mit der Beschreibung der vorliegenden Erfindung eine elektrische Schaltung aus Schaltelementen verstanden werden, die eine induktive Last mit Strom versorgen kann, beispielsweise eine Wicklung oder mehrere Wicklungen eines Motors, beispielsweise eines Schrittmotors, auf unterschiedliche Weisen mit einer Stromversorgung so verbinden kann, dass der Strom durch die induktive Last, also beispielsweise durch die betroffenen Wicklungen des Motors zu bestimmten Zeiten in bestimmten Richtungen fliessen kann. Dies kann vorzugsweise auch mit Hilfe einer sogenannten Pulsweitenmodulation geschehen, bei der die Schaltelemente im wesentlichen nur zwischen zwei Zuständen, «leitend» bzw. «nicht leitend», geschaltet werden können, wobei die Dauer der Zeiten, die sogenannten Pulsweiten, während derer die Schaltelemente einen diese Zustände einnehmen, die im Mittel an der induktiven Last anliegende Spannung bestimmt. Aufgrund dieser Spannung stellt sich ein Stromfluss in der induktiven Last ein. Bei diesem Verfahren kodiert also die Länge der Zeitintervalle, während derer die Spannung in Form einer binären Stufenfunktion ein- bzw. ausgeschaltet wird, den zeitlichen Verlauf des Stroms durch die induktive Last, beispielsweise eine Sinusfunktion, in dem Sinne, dass der niederfrequente Anteil der Stufenfunktion gerade die Sinusfunktion oder ein anderer gewünschter zeitlicher Verlauf des Stroms ist.

[0018] Unter einem Schaltelement soll im Zusammenhang mit der Beschreibung der vorliegenden Erfindung ein elektrisches oder elektronisches Bauelement verstanden werden, mit dessen Hilfe der Strom durch einen Leiter – vorzugsweise über eine Steuerspannung oder einen Steuerstrom - gesteuert werden kann. Bevorzugte Beispiele für solche Schaltelemente sind elektromagnetische Schalter wie sogenannte Relais, Bipolar-Transistoren oder Feldeffekt-Transistoren. Weitere Beispiele für Schaltelemente wären optoelektronische Schalter, oder ähnliche regelbare Widerstände, deren Widerstand von einer Steuergrösse abhängig ist.

[0019] Nachstehend wird die Erfindung anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele und mit Hilfe von Figuren näher beschrieben. Soweit dies aus Gründen der besseren Anschaulichkeit anhand von Beispielen erfolgt, soll hierdurch nicht der allgemeinere Charakter der vorliegenden Erfindung beschränkt werden, die ganz allgemein die Messung des Stroms durch eine induktive Last betrifft, wobei der Strom mit Hilfe einer Vollbrückenschaltung in die induktive Last gespeist wird.

[0020] Es zeigen

CH 701 137 A2

- Fig. 1 eine Grundsaltung einer Vollbrückenschaltung für die Ansteuerung induktiver Lasten, zum Beispiel der Wicklungen eines Schrittmotors.;
- Fig. 2 eine Modifikation der Grundsaltung gemäss Fig. 1, mit nur einer Vollbrücke, diese jedoch erweitert mit einer Einrichtung zur Messung des Stroms in der induktiven Last L;
- Fig. 3 die in Fig. 2 gezeigte Schaltung in einer getriebenen Phase (Antriebsphase), während der ein Antriebsstrom durch die induktive Last und den Messwiderstand fliesst;
- Fig. 4 die in Fig. 2 gezeigte Schaltung in einer Rezirkulationsphase, während der kein Strom durch den Messwiderstand fliesst;
- Fig. 5 ein Beispiel einer Vollbrückenschaltung mit einer induktiven Last und je einem Messwiderstand auf jeder Seite einer Induktivität und Einrichtungen zur Messung der Stromdifferenzen durch die beiden Messwiderstände einer Wicklung;
- Fig. 6 das in Fig. 5 gezeigte Schaltungsbeispiel in einer getriebenen Phase, während der ein Antriebsstrom durch die Induktivität und einen der beiden Messwiderstände fliesst;
- Fig. 7 das in Fig. 5 gezeigte Beispiel in einer Rezirkulationsphase, während der der Rezirkulationsstrom durch beide Messwiderstände fliesst;
- Fig. 8 ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, mit einem Schaltelement S1, das die Messsignale zum Differenzschaltung wahlweise zu- und wegschalten kann.
- Fig. 9 das in Fig. 8 gezeigte Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in einer getriebenen Phase, während der ein Antriebsstrom durch die induktive Last und einen der beiden Messwiderstände fliesst;
- Fig. 10 das in Fig. 8 gezeigte Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in einer Rezirkulationsphase, während der der Rezirkulationsstrom durch beide Messwiderstände fliesst;
- Fig. 11a in qualitativer und vereinfachter Weise den zeitlichen Verlauf der Messgrösse für den Strom in einer Schaltung gemäss Figur 2;
- Fig. 11b in qualitativer und vereinfachter Weise den zeitlichen Verlauf des Stroms durch eine Wicklung der Schaltung gemäss Fig. 2;
- Fig. 12a in qualitativer und vereinfachter Weise den zeitlichen Verlauf der Messgrösse für den Strom in einer Schaltung gemäss Figur 5;
- Fig. 12b in qualitativer und vereinfachter Weise den zeitlichen Verlauf der Messgrösse für den Strom in einer Schaltung gemäss Figur 8;
- Fig. 13 eine Teilschaltung einer erfindungsgemässen Schaltungsanordnung gemäss einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung;
- Fig. 14 ein Modifikation der in Fig. 13 gezeigten Teilschaltung gemäss einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung;
- Fig. 15 eine Grundsaltung für ein aktives Tiefpassfilter (TP).

[0021] Die Erfindung sieht ein Verfahren und eine Schaltungsanordnung zur Messung des Stroms durch eine induktive Last vor, wobei der Strom mit Hilfe einer Vollbrückenschaltung in die induktive Last gespeist wird. Solche Vollbrückenschaltungen werden beispielsweise verwendet, um einen Strom pulsweitenmoduliert in eine Wicklung eines Gleichstrom-, Schritt- oder Tauchspulensmotors zu speisen. Es ist jeweils eine Messeinrichtung (Ra, Rb), beispielsweise ein Messwiderstand für jede Halbbrücke vorgesehen. Dabei ist je ein Messwiderstand zwischen je einer Reihenschaltung von Schaltelementen und Masse (VSS) bzw. der Versorgungsspannung (VDD) angeordnet, an dem jeweils eine Spannung abgegriffen wird, die proportional zu dem Strom durch den jeweiligen Messwiderstand ist. Die Einrichtung zur Messung der Ströme verfügt über mindestens eine Umschalteinrichtung (S), mit der einer der beiden Eingänge (e1, e2) mindestens eines Differenzverstärkers wahlweise mit Masse (VSS) bzw. mit der Versorgungsspannung (VDD) oder einem der beiden Messwiderstände verbunden werden kann.

[0022] Wie in Fig. 1 gezeigt, werden zur Steuerung der Stromrichtung und gegebenenfalls auch der Stromstärke durch eine induktive Last üblicherweise sogenannte Brückenschaltungen verwendet, die eine Parallelschaltung von zwei Reihenschaltungen von Schaltelementen (Ta1, Ta2, bzw. Tb1 und Tb2) aufweisen. Die Steuerkontakte a1, a2, b1 und b2 dieser Schaltelemente werden jeweils von einer Logikschaltung Log angesteuert, die ihrerseits von einer Regelschaltung

Reg angesteuert wird, welche u.a. ein pulsweiten moduliertes Signal für die beiden Halbbrücken erzeugt, das die mittlere Spannung auf beiden Seiten der induktiven Last bestimmt. Mit Hilfe einer übergeordneten Regelung Reg und einer Strommessung gelingt es, einen bestimmten Strom durch die induktive Last einzuprägen.

[0023] Fig. 2 zeigt eine einfache Möglichkeit, den Strom durch die Induktivität zu messen und das Messergebnis der Steuerungslogik zur Verfügung zu stellen. Dazu wird die Spannung m an einem Messwiderstand R mit Hilfe eines Operationsverstärkers D gemessen und mit Hilfe eines Analog-Digital-Wandlers A/D in ein digitales Signal dm übersetzt, welches dann einer Regelschaltung Reg zur Auswertung und Steuerung zugeführt wird.

[0024] Fig. 3 zeigt den Stromfluss durch eine Induktivität L und einige Schaltelemente $Tb1$ und $Ta2$ und auch durch den Messwiderstand R der Schaltung gemäss Fig. 2 in einer Antriebsphase der Induktivität. Der Strom durch den Messwiderstand R erzeugt eine Spannung m am oberen Ende dieses mit Masse (VSS) verbundenen Widerstandes, die dem Eingang 11 eines Differenzverstärkers D zugeführt wird, dessen zweiter Eingang an Masse liegt. Ein Analog-Digital-Wandler A/D wandelt das Ausgangssignal dieses Differenzverstärkers D in ein entsprechendes digitales Signal dm , das der Regelschaltung Reg zur Steuerung der Brückenschaltungen zugeführt wird.

[0025] Fig. 4 zeigt dieselbe Schaltung in einer Rezirkulationsphase, während der der Rezirkulationsstrom durch die Wicklung L und durch die Schaltelemente $Ta2$ und $Tb2$ fliesst. Da dieser Strom nicht durch den Messwiderstand R fliesst, kann er durch die Strommessungsschaltung (D , A/D) nicht gemessen werden. Das Ausgangssignal des Differenzverstärkers D fällt also während der Rezirkulationsphasen auf null ab. Fig. 11a zeigt den zeitlichen Verlauf des Ausgangssignals des Differenzverstärkers D dieser Schaltung während der Antriebsphasen 181 und der Rezirkulationsphasen 182. Fig. 11b zeigt zum Vergleich den zeitlichen Verlauf des Stroms durch die Induktivität L während der Antriebsphasen 181 und der Rezirkulationsphasen 182.

[0026] Bei der in Fig. 2 gezeigten Schaltung verschenkt man also eine an sich verfügbare Information, weil man über den einzigen Messwiderstand nur die Summe der Ströme durch die Induktivität L messen kann. Das reicht möglicherweise aus, falls man sich nur für die Stromstärken während der «getriebenen» Phasen (der Antriebsphasen) interessiert, in denen die Wicklungen jeweils von einem Strom durchflossen werden, der von der Versorgungsspannung (VDD) durch eines der beiden oberen Schaltelemente ($Ta1$ oder $Tb1$), durch die Induktivität L und durch eines der unteren Schaltelemente ($Ta2$ oder $Tb2$) fliesst.

[0027] Um Verluste zu minimieren fügt man jedoch zwischen diese «getriebenen» Phasen sogenannte Rezirkulationsphasen ein, in denen die Induktivität für eine gewisse Zeit kurzgeschlossen werden, in denen also ein Strom durch L und beide untere Schaltelemente $Ta2$ und $Tb2$ fliesst. Dieser Rezirkulationsstrom, der aus dem magnetischen Feld der Induktivität L gespeist wird, fliesst nicht durch den Messwiderstand R der in Figur 2 gezeigten Schaltung. Aus diesem Grund kann der Rezirkulationsstrom mit der in Fig. 2 gezeigten Schaltung nicht gemessen werden.

[0028] Ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung sieht nun jeweils zwei Messwiderstände (Ra und Rb) vor, wobei je ein Messwiderstand zwischen je einer Reihenschaltung von Schaltelementen und Masse (VSS) oder der Versorgungsspannung (VDD) angeordnet ist, an dem jeweils eine Spannung abgegriffen wird, die proportional zu dem Strom durch den jeweiligen Messwiderstand (Ra und Rb) ist, und dass für jedes Paar von Messwiderständen (Ra , Rb) ein Differenzverstärker (D) vorgesehen ist, dessen Eingänge jeweils mit einem der beiden Messwiderstände (Ra , Rb) der Induktivität verbunden sind, deren Strom gemessen wird.

[0029] Die in Fig. 5 gezeigte Schaltung zeigt ein Schaltungsbeispiel, bei dem jeweils zwei Messwiderstände (Ra , Rb) für die Induktivität vorgesehen sind, und wobei je ein Messwiderstand zwischen je einer Reihenschaltung ($Ta1$, $Ta2$ bzw. $Tb1$, $Tb2$) von Schaltelementen und Masse (VSS) angeordnet ist, an dem jeweils eine Spannung ma , mb abgegriffen wird, die proportional zu dem Strom durch den jeweiligen Messwiderstand (Ra , Rb) ist. Dies hat den Vorteil, dass nun auch Rezirkulationsströme gemessen werden können, weil sie durch beide Messwiderstände (Ra und Rb) fließen.

[0030] Fig. 6 zeigt diese Schaltung in einer Antriebsphase, während der ein Antriebsstrom durch die Schaltelemente $Tb1$ und $Ta2$, durch die Induktivität L und durch den Messwiderstand Ra fliesst. Der Strom durch Ra führt zu einer Spannung ma am Eingang 11 des Differenzverstärkers D , wogegen durch Rb kein Strom fliesst, weshalb mb das Potential der Masse VSS hat. Die Differenz beider Signale ist also gleich ma oder gleich minus ma , je nachdem, mit welchem Vorzeichen die beiden Eingänge $e1$ und $e2$ behaftet sind.

[0031] Nicht gezeigt ist in den Figuren der Stromverlauf während der gegenläufigen Antriebsphase, in der ein Antriebsstrom durch die Schaltelemente $Ta1$ und $Tb2$, durch die Induktivität L und durch den Messwiderstand Rb fliesst. Dieser Strom durch Rb führt zu einer Spannung mb am Eingang $e2$ des Differenzverstärkers D , wogegen durch Ra kein Strom fliesst, weshalb ma das Potential der Masse VSS hat. Die Differenz beider Signale ist also gleich mb oder gleich minus mb , je nachdem, mit welchem Vorzeichen die beiden Eingänge 11 und 12 behaftet sind.

[0032] Nach dem Abschalten des Antriebsstroms einer Antriebsphase findet bei einigen Steuerschaltungen eine Rezirkulationsphase statt, die dazu dient, das während der Antriebsphase aufgebaute Magnetfeld der Induktivität ganz oder teilweise abzubauen/um den gewünschten, mittleren Strom zu erreichen. Während dieser Rezirkulationsphasen fliesst der Rezirkulationsstrom durch die Induktivität. Rezirkulationsphasen liegen typischerweise zwischen zwei Antriebsphasen eines mit dem Pulsweitenmodulationsverfahren angesteuerten Schrittmotors, anstatt den Strom durch Umpolen bzw. Umkehrung der Antriebsphase zu reduzieren.

[0033] In Fig. 7, die diese Schaltung während einer Rezirkulationsphase zeigt, fliesst der Rezirkulationsstrom durch beide Messwiderstände Ra und Rb. Die Spannungen ma und mb sind mit entgegengesetzten Vorzeichen betragsmässig gleich, weshalb ihre Differenz, das Ausgangssignal des Differenzverstärkers D, von Null verschieden und proportional zur Stärke des Rezirkulationsstroms ist. Der Rezirkulationsstrom ist also mit der Schaltung der Fig. 5 messbar.

[0034] Wird die Brücke in einen Rezirkulationsmodus versetzt, indem zwei «untere» Schaltelemente Ta2 und Tb2 leitend geschaltet werden, so fliesst der Strom durch beide Messwiderstände Ra und Rb. In der Folge wird durch die in den Fig. 5, 6 und 7 gezeigte Subtraktionsschaltung der doppelte Strom $I - (-I) = 2 \cdot I$ gemessen.

[0035] Fig. 12a zeigt den zeitlichen Verlauf am Ausgang des Differenzverstärkers D der Schaltung gemäss Fig. 5 während der Antriebsphasen 181 und der Rezirkulationsphasen 182. Man erkennt anhand dieser Figur, dass das Ausgangssignal in den Rezirkulationsphasen nicht auf null abfällt, die Rezirkulationsströme somit nun messbar sind, dass aber der zeitliche Verlauf des Signals am Ausgang des Differenzverstärkers D der Schaltung gemäss Fig. 5 insgesamt noch nicht dem Verlauf des Stroms entspricht, wie er in Fig. 11b gezeigt ist. Dies liegt an den Sprungstellen, die an den Übergängen zwischen den Antriebsphasen 181 und den Rezirkulationsphasen 182 liegen, da in dieser Phase (182) statt dem einfachen Strom I der doppelte Strom $2 \cdot I$ gemessen wird.

[0036] Ein solches Signal kann offensichtlich nicht sinnvoll gefiltert werden. Man würde ein verfälschtes Signal erhalten, dessen Mittelwert abhängig vom eigentlichen Strom, aber auch der Pulsweite der Pulsweitenmodulation wäre.

[0037] Zudem würde sich eine für die digitale Abtastung korrekte Filterung, um dem bekannten Abtasttheorem von Nyquist zu genügen, wegen der grossen Unstetigkeitsstellen im Signal bei der Modulationsfrequenz, als aufwendig und teuer erweisen.

[0038] Eine Verletzung des Abtasttheorems ginge andererseits mit den jedem Fachmann bekannten Schwierigkeiten des sogenannten «Aliasing», also einer durch die Verletzung des Abtasttheorems bewirkten Signalverfälschung einher. Die digitalen Signale d1 geben im Fall einer Verletzung des Abtasttheorems die Werte der gemessenen Differenz (ma-mb) nicht mehr unverfälscht wieder. Die sehr unerwünschte Folge dieser Verfälschung wäre eine teilweise schwerwiegende Störung der Stromregelung, die Instabilitäten aller Art im Verhalten des Gesamtsystems, zum Beispiel eines Schrittmotors nach sich ziehen kann.

[0039] Die vorliegende Erfindung sieht nun in einer Ausführungsform vor, die Einrichtungen zur Messung der Ströme mit je einer Umschalteneinrichtung S1 auszustatten, mit der einer der beiden Eingänge e1, e2 des Differenzverstärkers D wahlweise mit Masse (VSS) oder einem der beiden Messwiderstände (Ra, Rb) verbunden werden kann, deren Strom gemessen wird.

[0040] Diese Umschalteneinrichtung ist im einfachsten Fall gemäss einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ein einfacher Schalter S, der - wie in den Fig. 8, 9, 10, 13 und 14 anhand verschiedener Zustände von Ausführungsbeispielen einer erfindungsgemässen Schaltungsanordnung gezeigt wird - mit Hilfe eines Steuersignals c angesteuert wird. Dieses Steuersignal kann sehr einfach durch eine logische Verknüpfung beispielsweise der «Gate-Signale» a2, b2 der Schaltelemente abgeleitet werden, da diese Signale bestimmen, zu welchen Zeiten zwei «untere» Schaltelemente gleichzeitig leitend geschaltet sind. Dieses Signal c wird also verwendet, um die Messung einer Halbbrücke zu diesen Zeiten «auszublenden», indem ein Eingang des Differenzverstärkers D auf das entsprechende Bezugspotential (VSS) gelegt wird.

[0041] Somit ist zu jedem Zeitpunkt ein korrektes Abbild des Stroms der induktiven Last verfügbar. Dieses kann nun klassisch analog gefiltert werden, wofür man vorzugsweise den Differenzverstärker D in ein Tiefpassfilter zweiter Ordnung integriert und ein passives RC-Glied nachschaltet, wodurch man ein Tiefpass dritter Ordnung erhält. Eine entsprechende Grundschialtung zeigt die Fig. 15.

[0042] Für den Fall, dass die Messwiderstände nicht zwischen Masse VSS und den «unteren» Schaltelementen Ta2 bzw. Tb2 angeordnet sind sondern zwischen der Versorgungsspannung VDD und den «oberen» Schaltelementen Ta1 bzw. Tb1, sieht die vorliegende Erfindung eine entsprechende bevorzugte Ausführungsform vor, bei der die Einrichtungen zur Messung der Ströme mit je einer Umschalteneinrichtung S, ausgestattet sind, mit der einer der beiden Eingänge e1, e2 eines Differenzverstärkers D wahlweise mit der Versorgungsspannung VDD oder einem der beiden Messwiderstände (Ra, Rb) verbunden werden kann, deren Strom gemessen wird.

[0043] Bei geeigneter Steuerung dieser Umschalteneinrichtung S ist es möglich, die Sprungstellen bzw. die steilen Flanken in diesen Signalen an den in Fig. 12a gezeigten Übergängen zwischen den Antriebsphasen 181 und den Rezirkulationsphasen 182 zu beseitigen, und den in Fig. 12b gezeigten qualitativen Verlauf der gemessenen Signale dem in Fig. 11b gezeigten qualitativen Verlauf der Ströme durch die Induktivität L anzugleichen. Hierzu sieht die vorliegende Erfindung vor, dass einer der beiden Eingänge (e1, e2) des Differenzverstärkers (D) mit Masse (VSS) bzw. der Versorgungsspannung (VDD) und nicht einem der beiden Messwiderstände (Ra, Rb) verbunden wird, wenn der Strom durch die induktive Last gleichzeitig durch beide Messwiderstände fliesst.

[0044] Die Fig. 8 zeigt nun eine weitere Ausführungsform der Erfindung, bei der Umschalter S vorgesehen sind, die - wie in den Fig. 9 und 10 verdeutlicht wird - die Eingänge der Differenzverstärker D zwischen den Messpunkten ma, mb und Masse (VSS) so hin- und herschalten, je nachdem, ob sich die Schaltung gerade in einer Antriebsphase 181 (Fig. 9) oder in einer Rezirkulationsphase (Fig. 10) befindet. Diese Massnahme bewirkt, dass das Ausgangssignal der Differenzverstärker D

der Schaltung gemäss Fig. 8 sich so verhält, wie es in Fig. 12b gezeigt ist. Die Sprungstellen sind beseitigt und das Signal entspricht - bis auf konstante Faktoren - dem Strom in jeder Phase des Betriebs.

[0045] Diese Ausführungsform hat den Vorteil, dass das Ausgangssignal exakt dem Stromverlauf in der induktiven Last entspricht und mit einfachen, klassischen Mitteln für die digitale Abtastung korrekt gefiltert werden kann.

[0046] Wie in den Fig. 8, 9 und 10 anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels der Erfindung gezeigt wird, ist es durch diese Massnahme der vorliegenden Erfindung möglich, in den Zwischenphasen 182, während derer die Stromrichtung umgekehrt wird, die Differenzverstärker D nicht die Differenzen der Spannungen m_b und m_a messen zu lassen, sondern die jeweiligen Spannungen selbst. Durch diese Massnahme erhält man ein Signal, das zu jedem Zeitpunkt dem Strom in der induktiven Last entspricht.

[0047] Vorzugsweise wird dabei in den Zwischenphasen 182 anstelle der Differenzen die Spannung selbst gemessen. Hierzu sieht die vorliegende Erfindung vor, dass einer der beiden Eingänge (11, 12) des Differenzverstärkers (D) mit Masse (VSS) bzw. der Versorgungsspannung (VDD) und nicht einem der beiden Messwiderstände (R_a , R_b) verbunden wird, wenn der Strom durch die induktive Last gleichzeitig durch beide Messwiderstände fliesst.

[0048] Hierdurch werden die in Fig. 18b gezeigten Sprungstellen beseitigt. Das resultierende Signal entspricht qualitativ dem in Fig. 18a gezeigten zeitlichen Verlauf des Stroms durch die Induktivität. Die Erfindung beseitigt daher Sprungstellen oder sehr steile Flanken in den Messgrössen, und das Signal ist zu jedem Zeitpunkt proportional zum Strom in der Induktiven Last. Dadurch lässt es sich mit einfachen Mitteln für die folgende digitale Abtastung korrekt filtern, im Sinne des Abtasttheorems, wodurch die bekannten Aliasing-Probleme vermieden werden.

[0049] Durch die resultierende Verbesserung der Genauigkeit der Strommessung in der erfindungsgemässen Steuerung wird eine übergeordnete Regelschaltung, zum Beispiel eine Steuerung für Schrittmotoren entscheidend verbessert. Hierdurch ergibt sich eine höhere Regelbandbreite, die zu kleineren Bahnfehlern und zu einem kürzeren Einschwingen des Motors an der Zielposition führt. Weil es zu keiner Verletzung des Abtasttheorems bei der Strommessung mehr kommt, wird ein Heruntermischen von höherfrequenten Störungen in niederfrequente Bereiche vermieden. Hierdurch wird die Laufruhe des Schrittmotors entscheidend verbessert und es können höhere Reglersteifigkeiten erzielt werden.

[0050] Die Fig. 13 zeigt Teilschaltung einer erfindungsgemässen Schaltungsanordnung gemäss einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, mit der verdeutlicht werden soll, mit welchem geringem schaltungstechnischen Aufwand die erfindungsgemässe Lösung realisiert werden kann. Zur Erzeugung des zur Ansteuerung der Umschalteinrichtung S1 benötigten Steuersignals d können beispielsweise die Eingangssignale (beispielsweise die «Gate-Eingänge» a_2 , b_2) der beiden Schaltelemente Ta_2 und Tb_2 , durch ein einfaches UND-Gatter, das beispielsweise sehr einfach in Form eines sogenannten «Wired-AND» mit Dioden schaltungstechnisch realisiert werden kann, logisch verknüpft werden. Eine andere Möglichkeit besteht beispielsweise darin, das Steuersignal c durch einen gegebenenfalls ohnehin benötigten Mikroprozessor zu erzeugen.

[0051] Eine weitere, durch die Fig. 14 gezeigte modifizierte Teilschaltung verdeutlichte bevorzugte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung sieht vor, dass das Ausgangssignal des Differenzverstärkers (D) nach einer Tiefpassfilterung (TP) einer Analog-Digitalwandlung (A/D) unterzogen wird. Als Tiefpassfilter kann hierbei beispielsweise passive RC- oder LC-Filter oder Kombinationen davon, gepaart mit einer A/D-Abtastung verwendet werden. Es können aber auch aktive, Tiefpassfilter oder Kombinationen von aktiven und passiven Tiefpassfiltern verwendet werden, die beispielsweise mit Hilfe der ohnehin benötigten Differenzverstärker D, wie beispielsweise in Fig. 15 gezeigt, kostengünstig dargestellt werden können. Das auf diese Weise gewonnene digitale Signal kann anschliessend noch durch eine digitale Filterung weiter verarbeitet und beispielsweise einem digitalen Stromregler zugeführt werden.

[0052] Eine solche Filterung eliminiert auch Störungen, die durch Umschalteffekte und eine gegebenenfalls vorhandene benachbarte Brückenschaltung zur Ansteuerung einer zweiten induktiven Last, beispielsweise einer weiteren Motorwicklung verursacht werden.

[0053] Entsprechend gestaltete Ausführungsformen der Erfindung sind mit dem Vorteil verbunden, dass jede Halbbrücke (Ta_1 , Ta_2 und Tb_1 , Tb_2) ihren «eigenen» Messwiderstand erhält, an denen zwei unabhängige Messungen durchgeführt werden. Eine aufwendige Demodulation kann deshalb durch eine einfache Subtraktions-Schaltung mit einem Operationsverstärker (D) ersetzt werden. Dieser Operationsverstärker dient vorzugsweise gleichzeitig zur Verstärkung des Signals, so dass auch sehr niederohmige Messwiderstände eingesetzt werden können.

[0054] Anstelle von Messwiderständen können zur Verwirklichung der Erfindung auch andere Messeinrichtungen zur Strommessung verwendet werden, wie beispielsweise Hall-Sensoren. Wird ein Hall-Sensor von einem Strom durchflossen und in ein senkrecht dazu verlaufendes Magnetfeld gebracht, liefert er eine Ausgangsspannung, die proportional zum Produkt aus magnetischer Feldstärke und Strom ist. Ist der Strom bekannt, kann man die magnetische Feldstärke messen; wird das Magnetfeld durch einen stromdurchflossenen Leiter oder eine Spule erzeugt, kann man potentialfrei die Stromstärke in diesem Leiter bzw. der Spule messen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung des Stroms durch eine induktive Last (L), in welche der Strom mit Hilfe einer Vollbrückenschaltung (Ta1, Ta2, Tb1 und Tb2) gespeist wird, die eine Parallelschaltungen von zwei Reihenschaltungen von Schaltelementen (Ta1, Ta2 bzw. Tb1, Tb2) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass
 - a) an zwei Messeinrichtungen (Ra, Rb) jeweils eine Spannung abgegriffen wird, die ein Mass für den Strom durch die jeweilige Messeinrichtung (Ra, Rb) ist, wobei je eine Messeinrichtung zwischen je einer Reihenschaltung von Schaltelementen und Masse (VSS) oder der Versorgungsspannung (VDD) angeordnet ist,
 - b) diese Spannungen einem Differenzverstärker (D) zugeführt werden, dessen Eingänge (e1, e2) jeweils mit einer der beiden Messeinrichtungen (Ra, Rb) verbunden sind,
 - c) mit Hilfe einer Umschalteinrichtung (S) einer der beiden Eingänge (e1, e2) des Differenzverstärkers (D) wahlweise mit Masse (VSS) bzw. der Versorgungsspannung (VDD) oder einer der beiden Messeinrichtungen (Ra, Rb) verbunden wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem einer der beiden Eingänge (e1, e2) des Differenzverstärkers (D) mit Masse (VSS) bzw. der Versorgungsspannung (VDD) und nicht einer der beiden Messeinrichtungen (Ra, Rb) verbunden wird, wenn der Strom durch die induktive Last L gleichzeitig durch beide Messeinrichtungen (Ra, Rb) fließt.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Ausgangssignal des Differenzverstärkers (D) nach einer Tiefpassfilterung (TP) einer Analog-Digitalwandlung (A/D) unterzogen wird.
4. Schaltungsanordnung zur Messung des Stroms durch eine induktive Last (L), in welche der Strom mit Hilfe einer Vollbrückenschaltung (Ta1, Ta2, Tb1, Tb2) gespeist wird, die eine Parallelschaltungen von zwei Reihenschaltungen von Schaltelementen (Ta1, Ta2, Tb1, Tb2) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass
 - a) zwei Messeinrichtungen (Ra, Rb) vorgesehen sind, an denen jeweils eine Spannung abgegriffen wird, die ein Mass für den Strom durch die jeweilige Messeinrichtung (Ra, Rb) ist, wobei je eine Messeinrichtung zwischen je einer Reihenschaltung von Schaltelementen und Masse (VSS) oder der Versorgungsspannung (VDD) angeordnet ist,
 - b) diese Spannungen einem Differenzverstärker (D) zugeführt werden, dessen Eingänge jeweils mit einer der beiden Messeinrichtungen (Ra, Rb) verbunden sind,
 - c) eine Umschalteinrichtung (S) vorgesehen ist, mit deren Hilfe einer der beiden Eingänge (e1, e2) des Differenzverstärkers (D) wahlweise mit Masse (VSS) bzw. der Versorgungsspannung (VDD) oder einer der beiden Messeinrichtungen (Ra, Rb) verbunden werden kann.
5. Schaltungsanordnung nach Anspruch 4 mit einer Umschalteinrichtung (S), die so eingerichtet ist, dass einer der beiden Eingänge (e1, e2) des Differenzverstärkers (D) mit Masse (VSS) bzw. der Versorgungsspannung (VDD) und nicht einer der beiden Messeinrichtungen (Ra, Rb) verbunden wird, wenn der Strom durch die induktive Last L gleichzeitig durch beide Messeinrichtungen (Ra, Rb) fließt.
6. Schaltungsanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche bei der das Ausgangssignal des Differenzverstärkers (D) nach einer Tiefpassfilterung (TP) einem Analog-Digitalwandler (A/D) zugeführt wird.

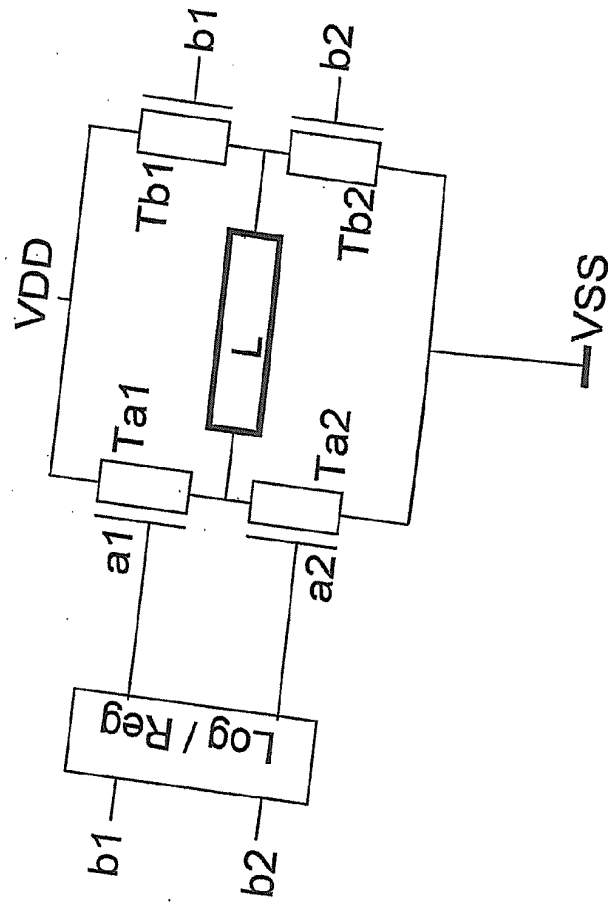


Fig. 1

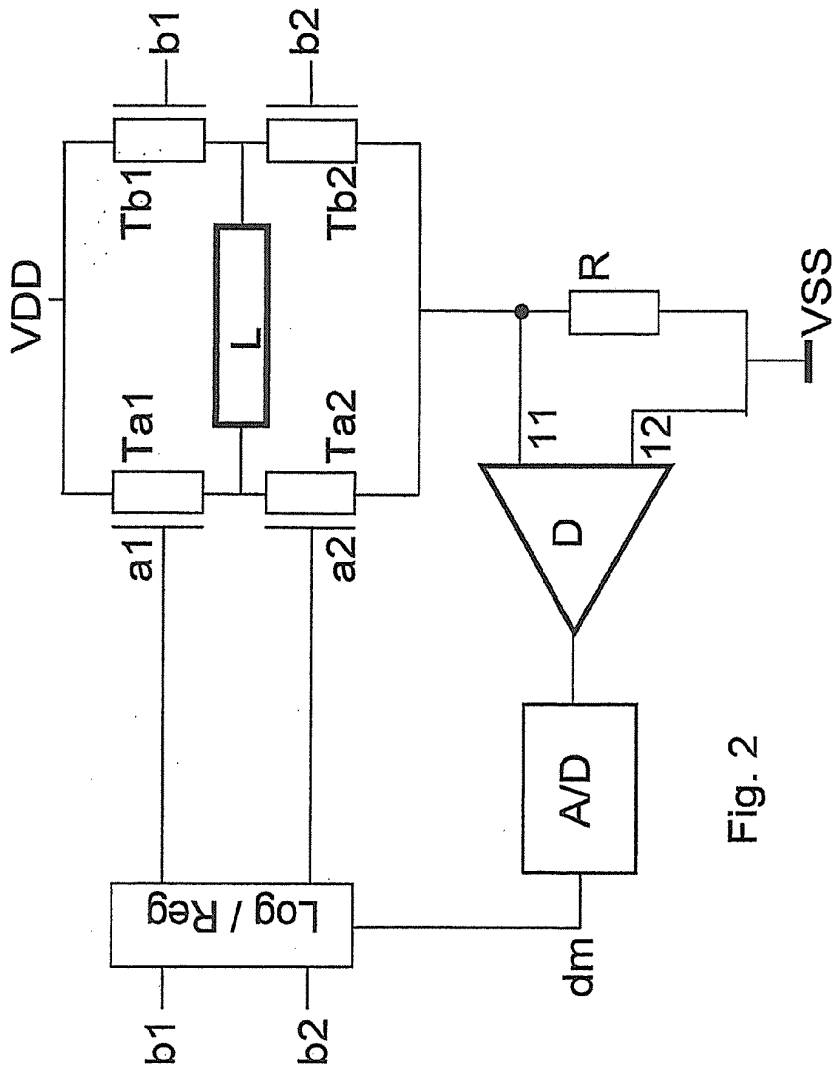


Fig. 2

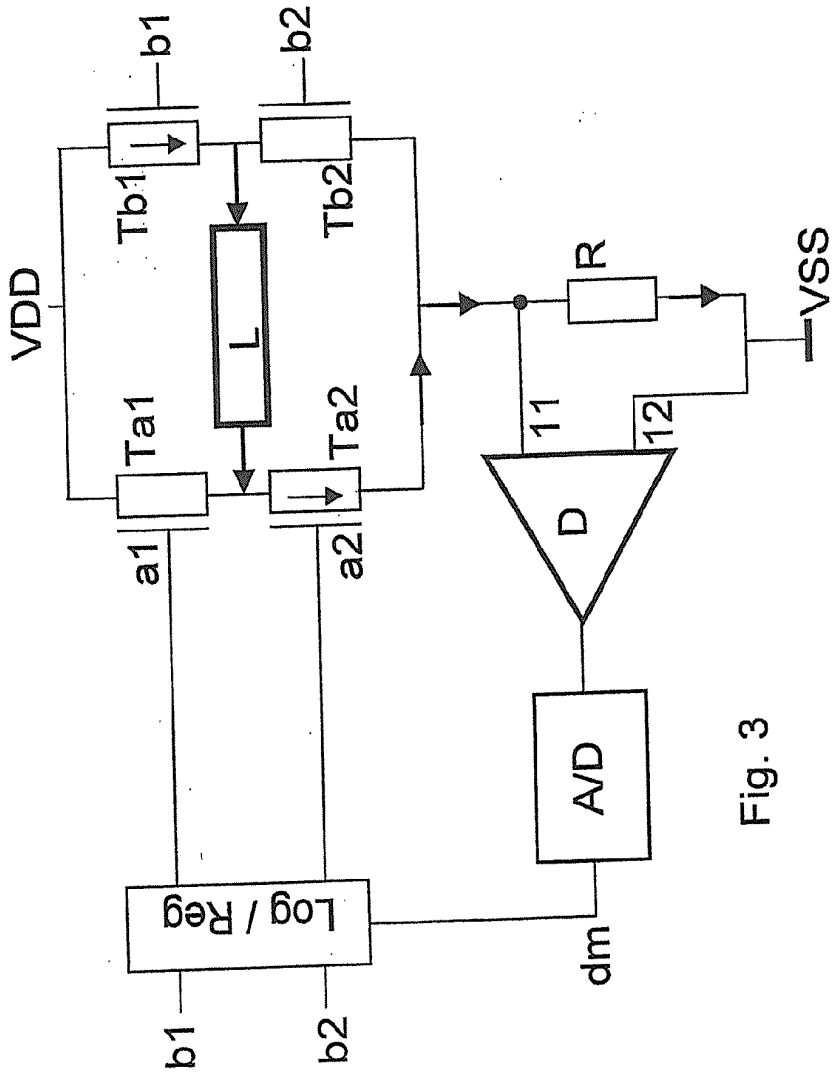


Fig. 3

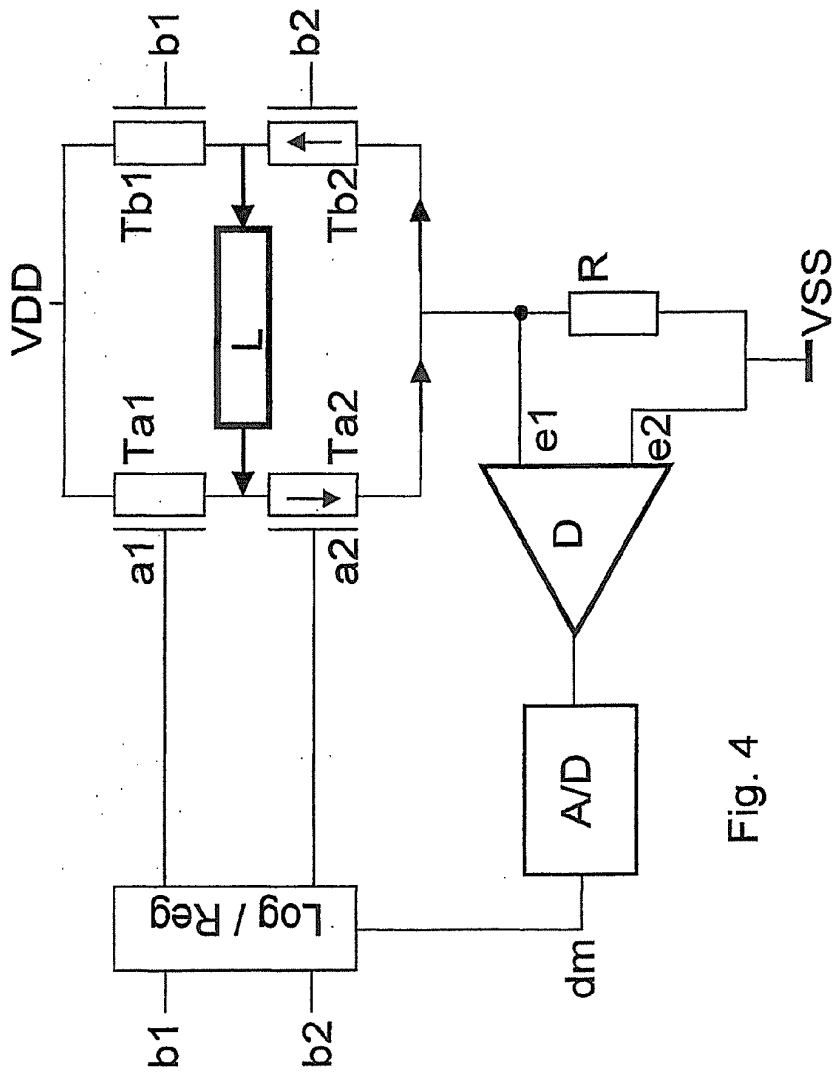


Fig. 4

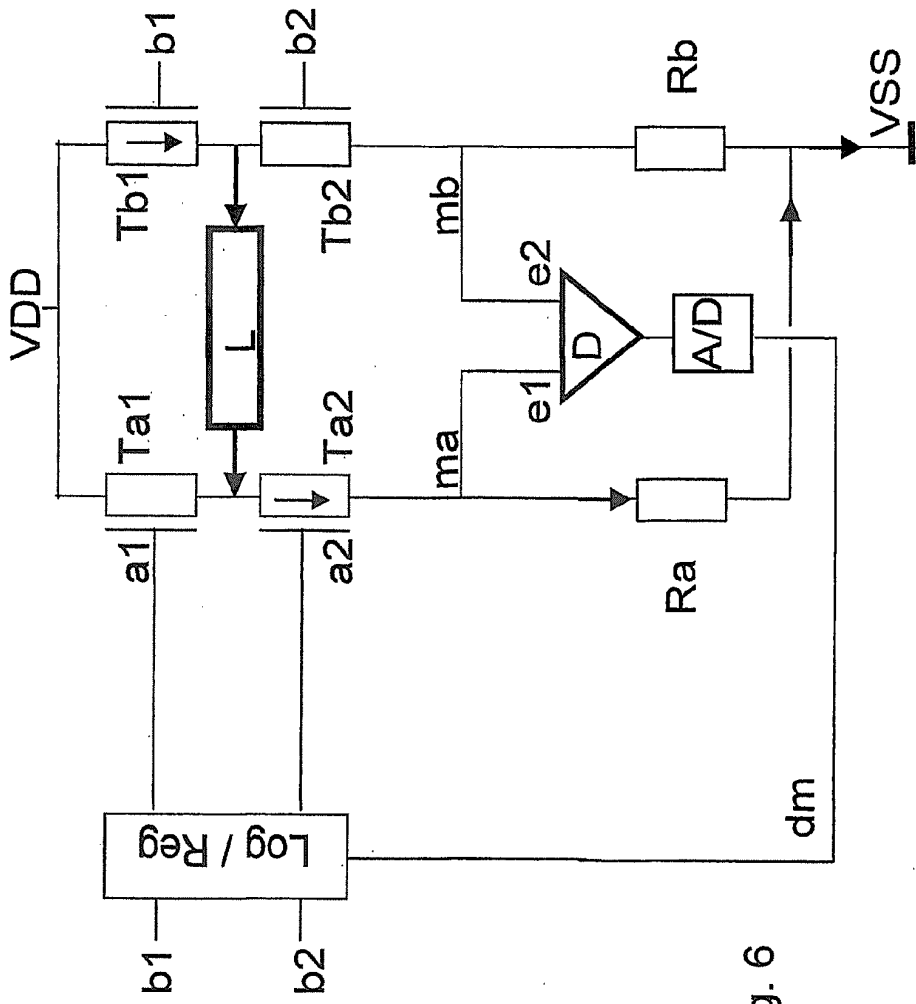


Fig. 6

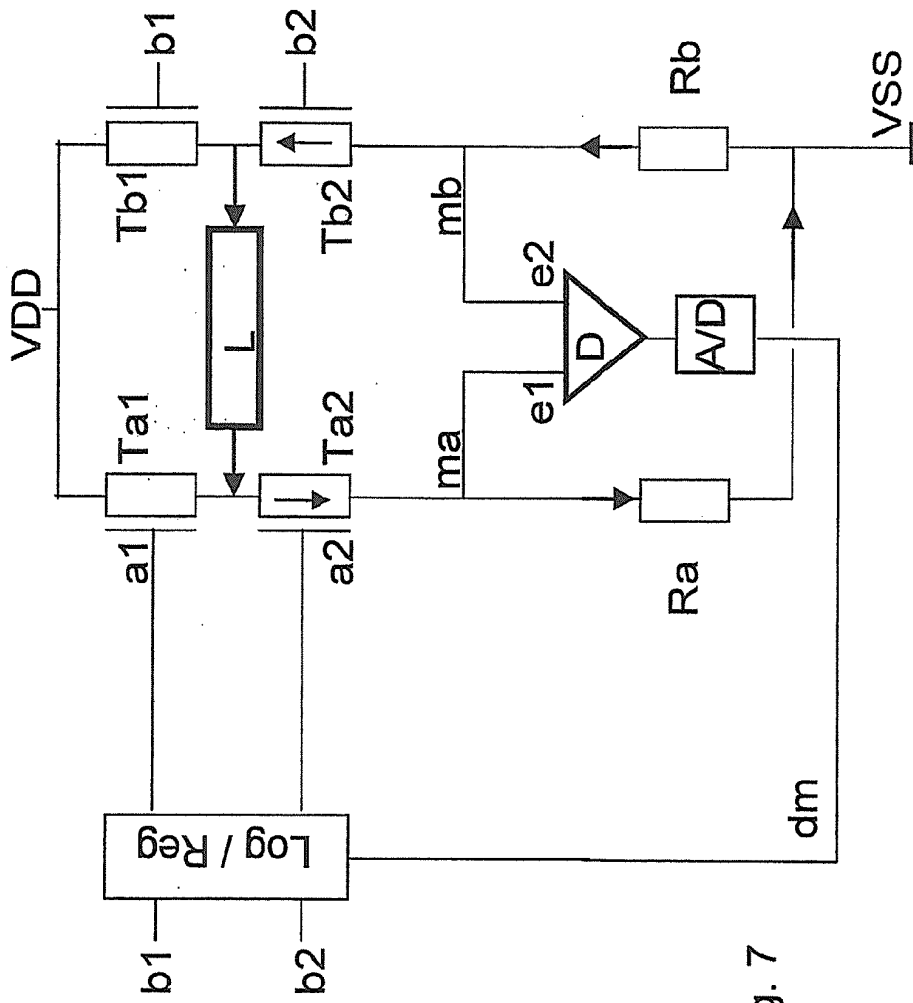


Fig. 7

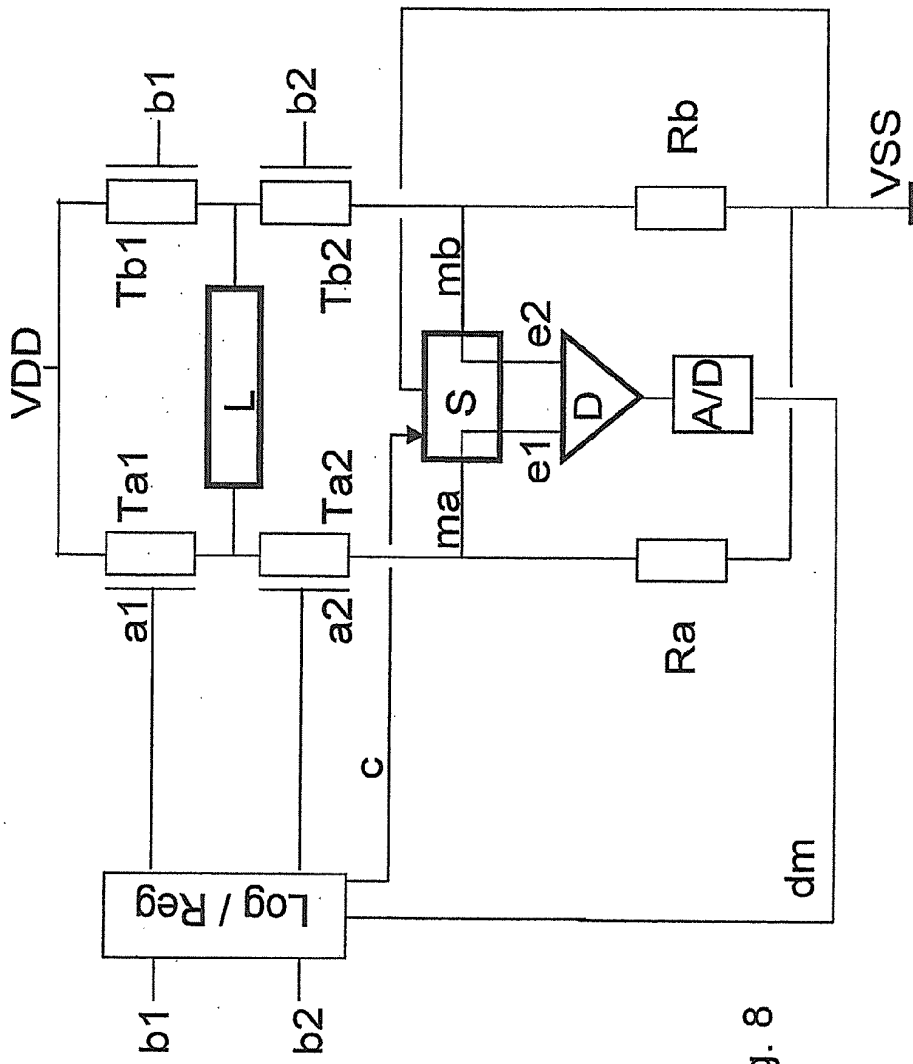


Fig. 8

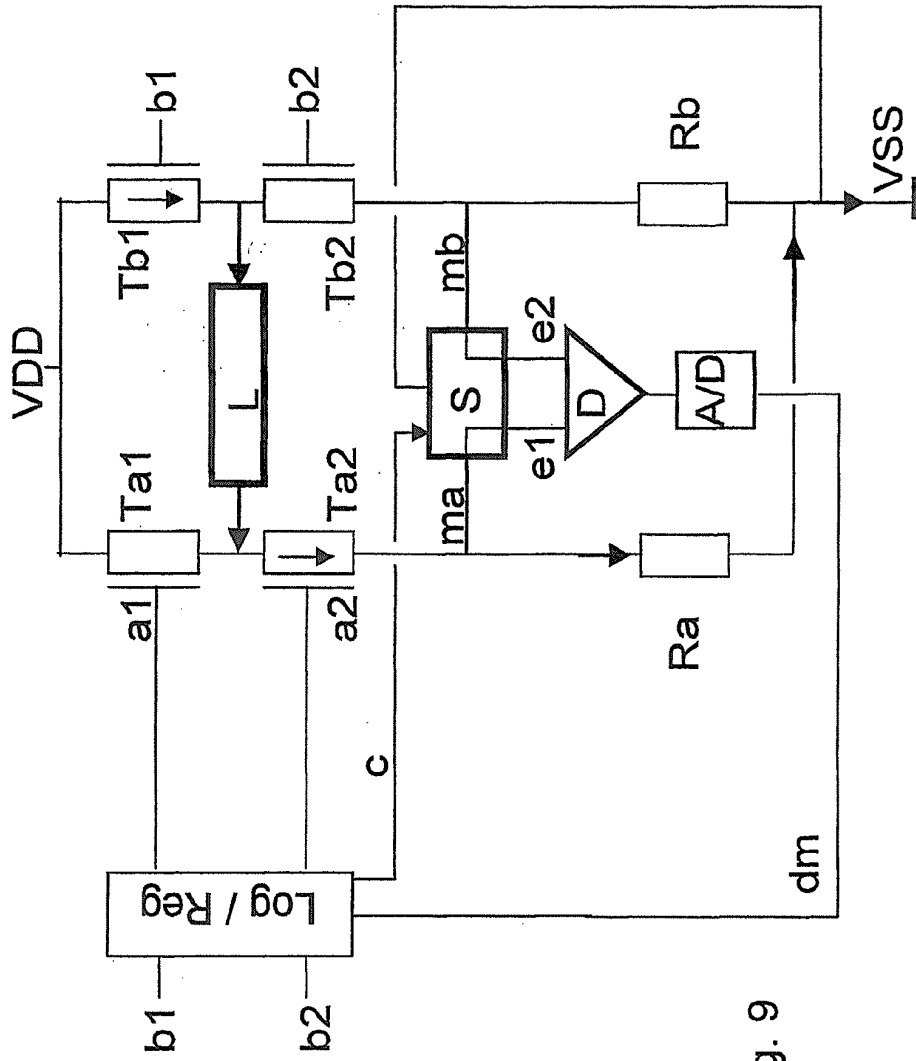


Fig. 9

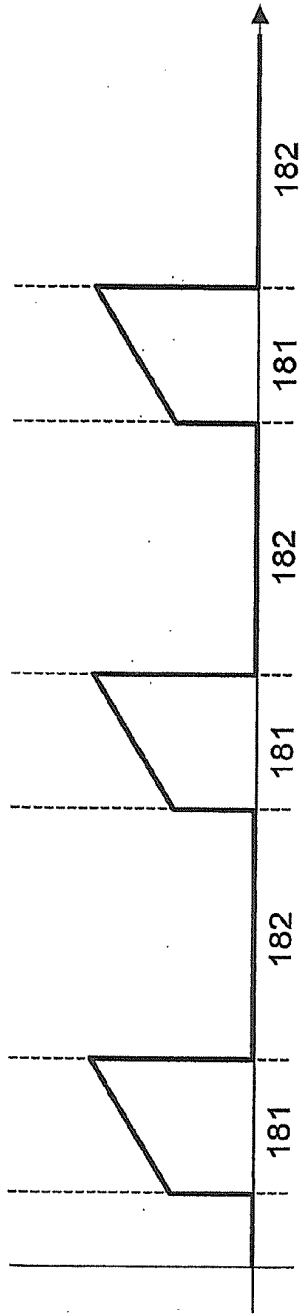


Fig. 11a

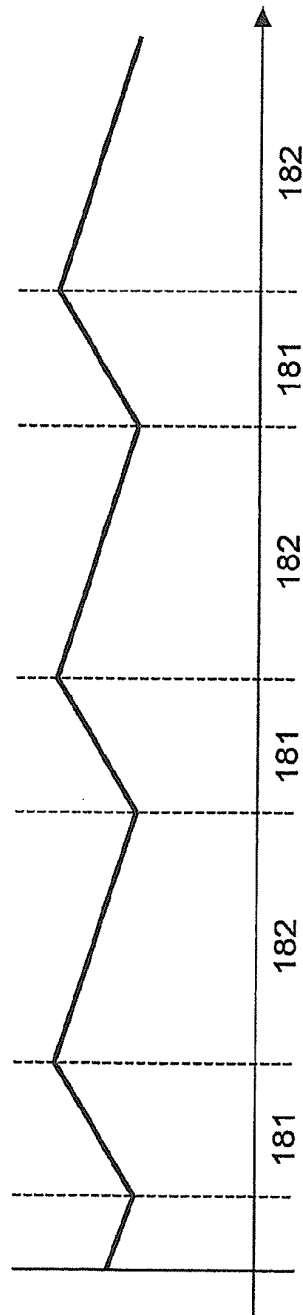


Fig. 11b

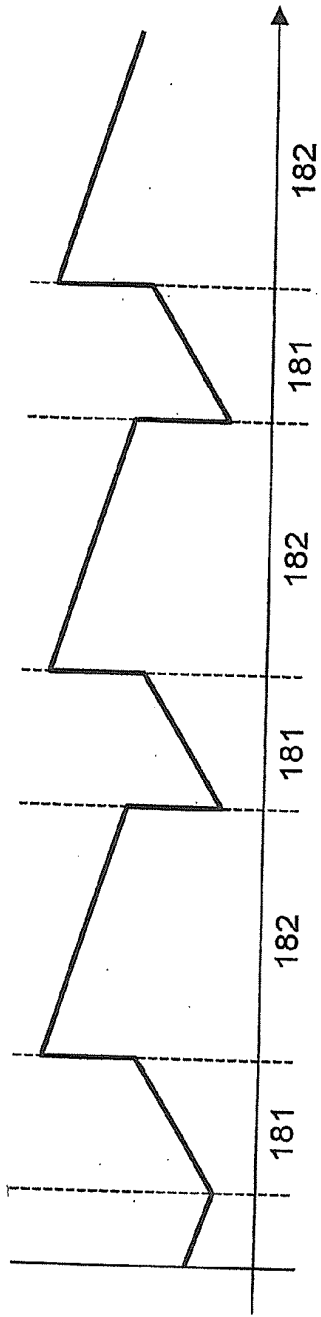


Fig. 12a

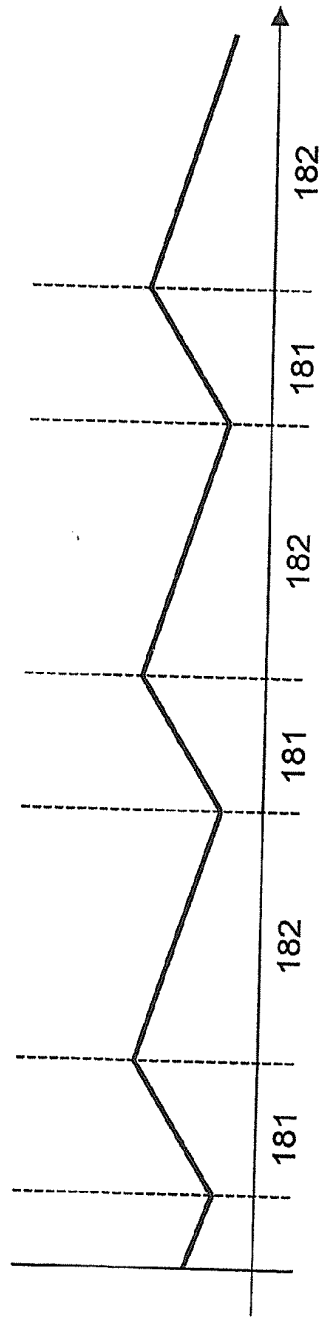


Fig. 12b

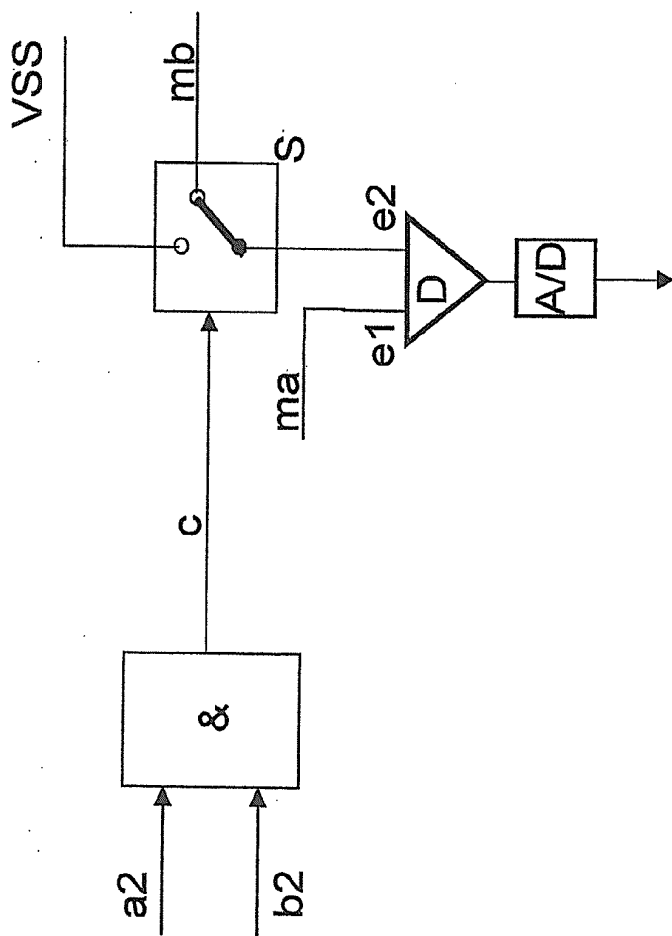


Fig. 13

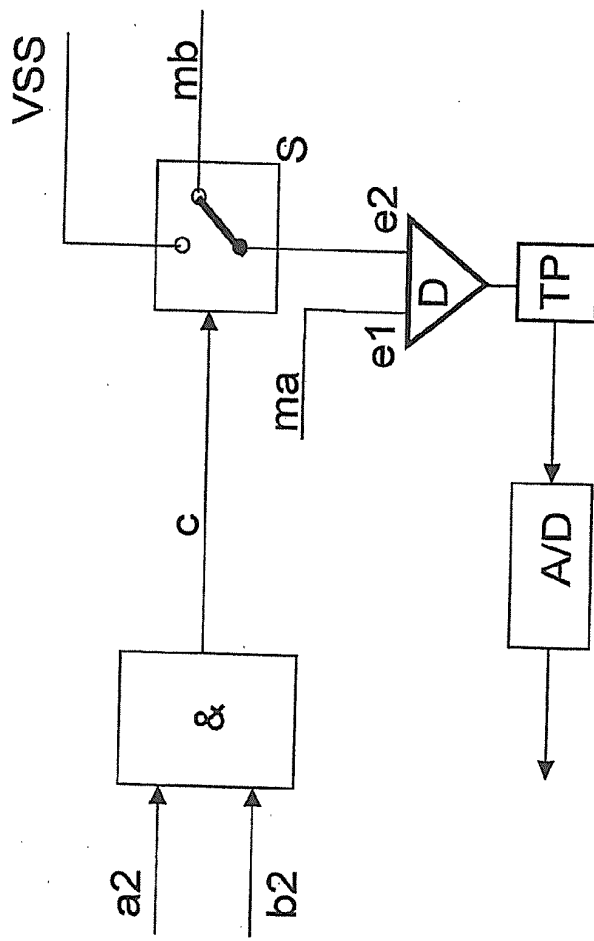


Fig. 14

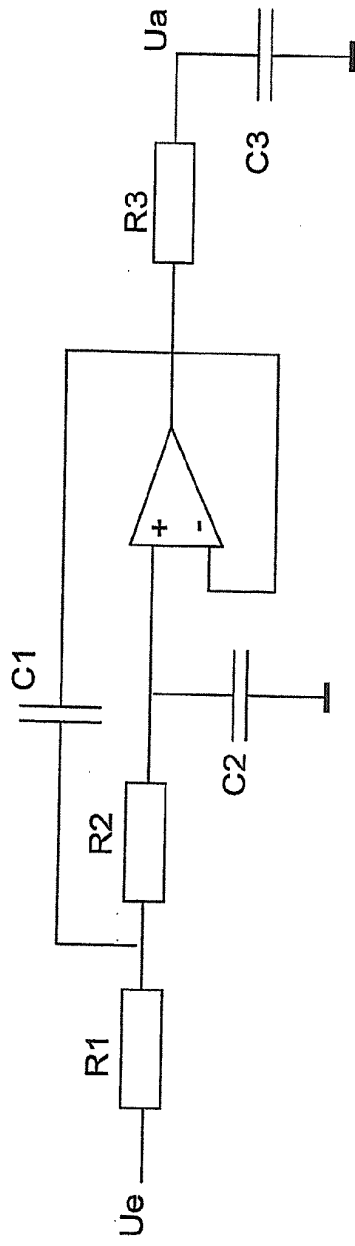


Fig. 15