



(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2012 218 773.1

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

(22) Anmeldetag: 15.10.2012

(43) Offenlegungstag: 17.04.2014

(71) Anmelder:

Continental Automotive GmbH, 30165, Hannover,  
DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE 10 2007 058 314 A1  
DE 10 2012 006 269 A1  
US 2011 / 0 279 133 A1  
US 5 804 979 A  
WO 2005/ 031 955 A1

(72) Erfinder:

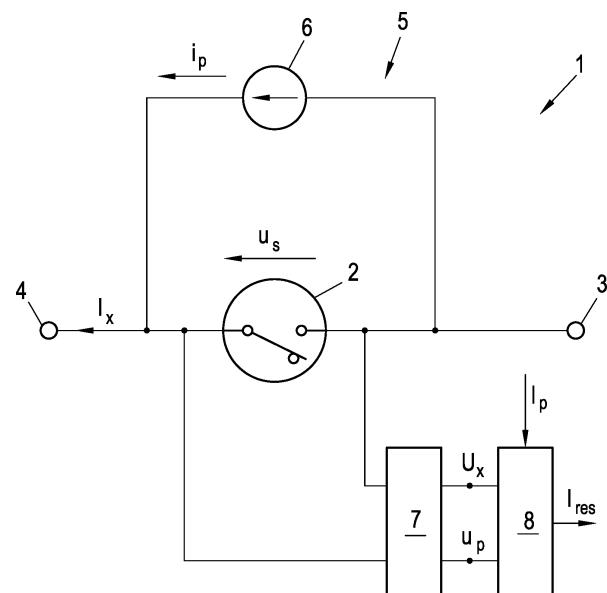
Neic, Aurel Vasile, Kasten bei Böheimkirchen, AT

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: Verfahren und Einrichtung zur Messung eines Stroms durch einen Schalter

(57) Zusammenfassung: Verfahren und Einrichtung (1) zur Messung eines Stroms ( $I_x$ ) durch einen Schalter (2) mit unbekanntem Innenwiderstand ( $R_s$ ), der zwei Anschlüsse (3, 4) aufweist, wobei eine Spannungsdifferenz ( $u_s$ ) an dem Schalter gemessen wird, wobei mit Hilfe einer Wechselstromquelle (6), die Teil eines parallel zum Schalter (2) geschalteten Wechselstromkreises (5) ist, wobei sowohl Amplitude ( $i_p$ ) als auch Frequenz ( $f_p$ ) des von der Wechselstromquelle (6) gelieferten Stroms ( $i_p$ ) bekannt sind, im Betrieb dem zu messenden Strom ( $I_x$ ) durch den Schalter (2) der von der Wechselstromquelle gelieferte Strom ( $i_p$ ) überlagert wird; ein Wechselspannungsanteil ( $u_p$ ) der Spannungsdifferenz ( $u_s$ ) und dessen Amplitude ( $U_p$ ) ermittelt wird; und der Strom ( $I_x$ ) zwischen den Anschlüssen (3, 4) proportional zur Amplitude ( $i_p$ ) des Stroms ( $i_p$ ) der Wechselstromquelle (6) ermittelt und ausgegeben wird.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren sowie eine Einrichtung zur Messung eines Stroms durch einen Schalter mit unbekanntem Innenwiderstand, der zwei Anschlüsse aufweist, wobei eine Spannungsdifferenz an dem Schalter, mit einer Messschaltung zur Ermittlung der an dem Schalter anliegenden Spannung, gemessen wird.

**[0002]** Es ist bekannt, dass bei derartigen Messungen die Messergebnisse naturgemäß eine signifikante Abhängigkeit vom zum Zeitpunkt der Messung aktuellen Innenwiderstand des Schalters aufweisen. Demzufolge variieren bei gleichem Strom die gemessenen Spannungen beispielsweise zwischen prinzipiell baugleichen Schaltern (und damit die Strommessungen) aufgrund von Exemplarstreuungen und zusätzlich aufgrund von umgebungsabhängigen Parametern, wie beispielsweise der Temperatur. Üblicherweise wird daher versucht, die schwankenden bzw. veränderlichen Parameter durch Kalibrierung und Temperaturmessung, unter Verwendung einer Tabelle mit Kompensationswerten, zu berücksichtigen. Dabei wirkt sich jedoch die schlechte Korrelation zwischen gemessener Temperatur und tatsächlicher Schaltertemperatur nachteilig aus. Bei Situationen mit mehreren parallel geschalteten Schaltern ist diese Korrelation noch schlechter und eine Kompensation daher nach schwieriger.

**[0003]** Daher ist es Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren sowie eine Einrichtung der eingangs angeführten Art zu schaffen, bei denen die Abhängigkeit des Messergebnisses von Temperatur und Exemplarstreuung zumindest reduziert ist.

**[0004]** Das erfindungsgemäße Verfahren der eingangs angeführten Art löst diese Aufgabe, indem mit Hilfe einer Wechselstromquelle, die Teil eines parallel zum Schalter geschalteten Wechselstromkreises ist, wobei sowohl Amplitude als auch Frequenz des von der Wechselstromquelle gelieferten Stroms bekannt sind, im Betrieb dem zu messenden Strom durch den Schalter der von der Wechselstromquelle gelieferte Strom überlagert wird, ein Wechselspannungsanteil der Spannungsdifferenz und dessen Amplitude als maximaler Spannungswert ermittelt wird und der Strom zwischen den Anschlüssen proportional zum Maximalstrom der Wechselstromquelle ermittelt und ausgegeben wird. Bei der korrespondierenden erfindungsgemäßen Einrichtung ist daher parallel zum Schalter ein Wechselstromkreis mit einer Wechselstromquelle, die einen Wechselstrom mit bekannter Amplitude und bekannter Frequenz liefert, geschaltet, wobei im Betrieb der Wechselstrom dem zu messenden Strom durch den Schalter überlagert ist, und die Messschaltung zur Ermittlung eines Wechselspannungsanteils der an dem Schalter anliegenden Spannung eingerichtet ist. Da die Amplitude des Wechselstroms bekannt ist, kann – unter der Annahme eines linearen Schalterwiderstands anhand der Amplitude des Wechselspannungsanteils auf den aktuellen Innenwiderstand des Schalters geschlossen werden, ohne den Gleichstrom unterbrechen zu müssen oder zu beeinflussen.

**[0005]** Wenn neben dem Wechselspannungsanteil ein Gleichspannungswert der Spannungsdifferenz ermittelt wird bzw. wenn die Messschaltung zur Ermittlung eines Gleichspannungsanteils der an dem Schalter anliegenden Spannung eingerichtet ist, kann der Strom zwischen den Anschlüssen vorteilhaft aus der Amplitude des Wechselstroms der Wechselstromquelle und dem Verhältnis der ermittelten Spannungswerte ermittelt und ausgegeben werden; unabhängig vom aktuellen Schalterwiderstand. Bevorzugt weist die Messschaltung hierfür zumindest einen Tiefpassfilter zur Ermittlung eines Gleichspannungsanteils der an dem Schalter anliegenden Spannung auf. Dieses Verfahren bzw. diese Einrichtung machen sich die Tatsache zunutze, dass bei gleichem Widerstand das Verhältnis zweier Ströme dem Verhältnis der beiden zugeordneten Spannungen entspricht. Konkret schafft diese Technik durch Überlagerung eines bekannten Wechselstroms die Möglichkeit, den Innenwiderstand des Schalters zum Zeitpunkt der Messung implizit zu bestimmen. Etwaige diesen Innenwiderstand verändernde Einflussfaktoren können somit praktisch eliminiert werden, so dass sie das Messergebnis nicht mehr bzw. zumindest deutlich weniger beeinflussen. Um eventuelle zeitlich veränderliche Parameter korrekt zu berücksichtigen, können die Ermittlung des Gleichspannungsanteils und die Ermittlung des Wechselspannungsanteils gleichzeitig durchgeführt werden.

**[0006]** Insbesondere bei im Vergleich zur Amplitude des Wechselstroms kleinen Gleichströmen ist es vorteilhaft, wenn der Schalter ein Halbleiter-Schalter ist, der mit einem Gatesignalgenerator zur Steuerung eines Schauerwiderstands verbunden ist, wobei der von der Wechselstromquelle gelieferte Strom unterbrochen, der Schalterwiderstand von dem Gatesignalgenerator periodisch, vorzugsweise mit der Frequenz der Wechselstromquelle, moduliert und ein weiterer Wechselspannungsanteil der Spannungsdifferenz ermittelt wird, wobei der Strom zwischen den Anschlüssen proportional zum Produkt des Maximalstroms der Wechselstromquelle und des weiteren Wechselspannungsanteils ermittelt und ausgegeben wird. Eine Messung des Gleichstromanteils ist dabei zur Ermittlung des Stroms zwischen den Anschlüssen nicht erforderlich, wobei der absolute In-

nenwiderstand des Schalters unbekannt sein kann, aber die vom Gatesignalgenerator erzeugte Widerstandsänderung bekannt sein muss.

**[0007]** Bei einer vorteilhaften Weiterbildung des Verfahrens zur Messung des Stroms durch den Schalter muss auch die Widerstandsänderung nicht bekannt sein, sondern wird im Rahmen des Verfahrens ermittelt. Diese Weiterbildung umfasst die folgenden Schritte:

- a) eine erste Einstellung des Schalterwiderstands wird gewählt;
- b) ein erster Wechselspannungsanteil der Spannungsdifferenz wird ermittelt;
- c) eine zweite Einstellung des Schalterwiderstands wird gewählt;
- d) ein zweiter Wechselspannungsanteil der Spannungsdifferenz wird ermittelt;
- e) die Wechselstromquelle wird deaktiviert;
- f) der Schalterwiderstand wird von dem Gatesignalgenerator periodisch, entsprechend einem Rechtecksignal, zwischen der ersten und der zweiten Einstellung umgeschaltet, vorzugsweise mit derselben Frequenz, die der zuvor von der Wechselstromquelle erzeugte Wechselstrom hatte;
- g) ein dritter Wechselspannungsanteil der Spannungsdifferenz wird ermittelt;
- h) der Strom zwischen den Anschlüssen wird aus einem Maximalstrom der Wechselstromquelle und dem Verhältnis des dritten Wechselspannungsanteils und der Differenz aus erstem und zweiten Wechselspannungsanteil ermittelt und ausgegeben.

**[0008]** Zur raschen Ermittlung der Stromrichtung im Rahmen eines der oben beschriebenen Verfahren kann ein entweder durch Überlagerung eines Wechselstroms oder durch Modulation des Schalterwiderstand hervorgerufener Wechselspannungsanteil der Spannungsdifferenz mit einem Referenzsignal multipliziert und die Stromrichtung anhand des Vorzeichens des Produktsignals ermittelt und ausgegeben werden, wobei vorzugsweise das Referenzsignal die gleiche Frequenz wie der Wechselstrom respektive der Schalterwiderstand aufweist. Bei dieser Variante der Erfindung wird die bei wechselnder Stromrichtung (d. h. Vorzeichenwechsel des Gleichstromanteils) effektiv um im Wesentlichen  $180^\circ$  gedrehte Phase des Wechselspannungsanteils und die Sensibilität des Produktsignals bezüglich Phasenverschiebungen ausgenutzt, um einen Wechsel der Stromrichtung meist innerhalb der ersten Halbperiode einer Schwingung zu erkennen. Bei einer und derselben Messung sollte dabei die Frequenz der Modulation und der Demodulation ident und deren Phase korreliert sein, aber es können bei verschiedenen Messmethoden bzw. Messungen verschiedene Frequenzen verwendet werden. Wenn z. B. mehrere Filter zur Verfügung stehen (oder eine Filterbank, welche verstimmbar ist, z. B. ein Schaltkondensatorfilter), kann eine Messung bei einer Frequenz durchgeführt werden und eine andere bei einer zweiten Frequenz.

**[0009]** Falls etwaige dem zu messenden Strom überlagerte Frequenzen nicht oder kaum vorhersehbar sind, ist es vorteilhaft, wenn die Frequenz der Wechselstromquelle und gegebenenfalls des Gatesignalgenerators verändert wird, sobald ungünstige Frequenzkomponenten, wie Mischprodukte, Oberwellen, Aliasingartefakte etc., im Strom zwischen den Anschlüssen erkannt werden. Dieses Verfahren ist auch dann nützlich, wenn mit stark wechselnden und teilweise so hohen Störfrequenzen zu rechnen ist, dass eine Wechselstromquelle mit noch höheren Frequenzen bereits Probleme mit der Abstrahlung elektromagnetischer Wellen verursachen würde. In diesem Fall ist es günstiger, eine relativ niedrige Frequenz zu wählen und bei Bedarf, d. h. bei Überlappung der Frequenzbereiche, entsprechend auszuweichen.

**[0010]** Zum Schutz des Schalters, aber auch als Schutzfunktion gegen Fehlerströme ist es günstig, wenn der Schalter ausgeschaltet wird, wenn der ermittelte Strom größer als ein vorbestimmter Grenzwert ist. Der Grenzwert hängt dabei selbstverständlich von der jeweiligen Anwendung ab.

**[0011]** Eine einfache Möglichkeit, den Wechselspannungsanteil zu ermitteln, besteht darin, in der Messschaltung zumindest einen Bandpassfilter zur Ermittlung des Wechselspannungsanteils der an dem Schalter anliegenden Spannung vorzusehen. Insbesondere wenn der Filter bzw. dessen Übertragungsfunktion nicht konfigurierbar sein muss, können hierfür relativ kostengünstige Bauteile verwendet werden.

**[0012]** Um die Analyse der Gleich- und Wechselspannungsanteile zu vereinfachen, ist es vorteilhaft, wenn die Messschaltung einen Differenzverstärker zur Verstärkung der an dem Schalter anliegenden Spannung aufweist. Insbesondere erlaubt ein Differenzverstärker eine vom Potential des Schalters unabhängige Spannungsmessung, beispielsweise innerhalb eines getrennten und unabhängig versorgten Stromkreises.

**[0013]** Um eine einfache Änderung des Schalter-Innenwiderstands zu ermöglichen und bei der Messung einen besonders breiten Strombereich abzudecken, ist es günstig, wenn der Schalter ein Halbleiter-Schalter ist, der mit einem Gatesignalgenerator zur Steuerung eines Schalterwiderstands verbunden ist. In diesem Fall kann

mittels entsprechender Einstellungen der Gatespannung des Halbleiter-Schalters der Innenwiderstand im gewünschten Ausmaß geändert oder – einen geeigneten Gatesignalgenerator vorausgesetzt – sogar moduliert werden. Außerdem kann bei Strömen unterhalb des bekannten Wechselstromwerts der Schalterwiderstand erhöht und bei Strömen oberhalb des bekannten Wechselstromwerts der Schalterwiderstand gesenkt werden, so dass ein bestimmter Strombereich auf einen im Vergleich zu einem konstanten Widerstand kleineren Spannungsbereich abgebildet wird, was folglich bei gegebener Dynamik der Spannungsmessung die Abdeckung eines breiteren Strombereichs ermöglicht.

**[0014]** Der Gatesignalgenerator kann im einfachsten Fall einen Gatespannungsschalter mit zumindest zwei und bevorzugt drei Schaltzuständen aufweisen, wobei jedem Schaltzustand ein unterschiedlicher Schalterwiderstand zugeordnet ist. Der Gatesignalgenerator kann hierbei den Schalterwiderstand durch Anlegen verschiedener Gatespannungen anpassen. Dabei ist vorteilhaft eine der möglichen Gatespannungen so gewählt, dass der Schalter damit im Wesentlichen ausgeschaltet ist. Um dennoch einen breiteren Strombereich zu erschließen, benötigt der Gatespannungsschalter zumindest zwei zusätzliche Schaltzustände für zwei verschiedene Gatespannungen und daher insgesamt mindestens drei. Das Ausschalten mittels einer Gatespannung kann jedoch auch entfallen, sodass dann zwei verschiedene Gatespannungen ausreichen.

**[0015]** Es stellt sich heraus, dass es besonders bei Messungen von im Vergleich zum Wechselstrom erheblich niedrigeren Strömen äußerst vorteilhaft ist, wenn der Gatesignalgenerator einen Taktgeber zum zeitgesteuerten, periodischen Umschalten zwischen zumindest zwei unterschiedlichen Gatespannungen aufweist, da somit der zu messende Strom aus dem Hub des aufgrund des wechselnden Schalterwiderstands bei ausgeschalteter Wechselstromquelle generierten Wechselspannungsanteils ermittelt werden kann. Bei geeigneten gewählten Schalterwiderständen ist dieser Hub einfacher zu messen als der ansonsten zu messende Gleichspannungsanteil.

**[0016]** In den Situationen, bei denen der zu messende Strom deutlich kleiner als der von der Wechselstromquelle gelieferte Strom ist, gestaltet sich – wie erwähnt – die Analyse des Gleichspannungsanteils bei aktiver Wechselstromquelle als schwierig. Wenn der zu messende Strom jedoch durch periodische Variation des Schalterwiderstands, wie oben erwähnt, in eine Wechselspannung mit bekannter Frequenz umgewandelt wird, lässt sich das zu messende Signal verhältnismäßig besser filtern und verstärken, so dass letztendlich eine präzisere Messung des Stroms ermöglicht wird.

**[0017]** Unabhängig von den bisher geschilderten Verbesserungen ist es günstig, wenn parallel zum Schalter ein Ausschalter zum Öffnen des Wechselstromkreises vorgesehen ist. Insbesondere kann mittels eines derartigen Ausschalters ein den geöffneten Schalter über die ansonsten vom Wechselstromkreis gebildete Nebenverbindung umgehender Strom vermieden werden.

**[0018]** Um etwaige von der Wechselstromquelle gelieferte Gleichstromanteile, welche die Messung verfälschen könnten, zuverlässig zu vermeiden, ist es vorteilhaft, wenn die Wechselstromquelle über eine induktive Kopplung mit dem übrigen Wechselstromkreis verbunden ist. Dadurch werden die Gleichstromanteile der Wechselstromquelle eliminiert.

**[0019]** Die erfindungsgemäße Einrichtung eignet sich besonders zur Messung eines Lade- und Entladestroms einer Batterie, z. B. in Kraftfahrzeugen, wobei mit einem der Anschlüsse des Schalters die Batterie und mit dem anderen Anschluss ein Stromgenerator, insbesondere eine Lichtmaschine, verbunden ist. Bei Anwendungen dieser Art, wie sie beispielsweise im KFZ-Bereich häufig sind, ist das oben geschilderte Problem der Temperaturschwankungen besonders auffällig und zugleich ist es aufgrund der Abhängigkeit derartiger Anwendungen vom Ladezustand der Batterie entscheidend, jeden noch so geringen Entladestrom möglichst akkurat zu messen.

**[0020]** Es ist weiters in vielen Fällen vorteilhaft, wenn der Schalter zumindest einen Feldeffekttransistor mit isoliertem Gate, insbesondere zumindest einen MOSFET, aufweist. Dieser Schalttyp erlaubt eine sichere Schaltung von Strömen auch bei mehreren Ampere und auch in Gefahrenumgebungen. Außerdem eignet sich dieser Schalttyp besonders für die Verwendung in der erfindungsgemäßen Einrichtung, weil er einen endlichen und einstellbaren, mit großen Toleranzen behafteten, Innenwiderstand aufweist.

**[0021]** Eine verhältnismäßig einfache und kostengünstig realisierbare und trotzdem präzise Messung des Wechselspannungsanteils kann dadurch erzielt werden, dass die Messschaltung mit einer Verarbeitungseinheit verbunden ist, wobei die Verarbeitungseinheit einen Multiplizierer zum Modulieren des Wechselspannungsanteils mit einem periodischen Referenzsignal aufweist, wobei die Frequenz des Referenzsignals im

Wesentlichen gleich der Frequenz des von der Wechselstromquelle erzeugten Wechselstroms ist und wobei der Ausgang des Multiplizierers mit einem Tiefpassfilter oder mehreren in Reihe geschalteten Tiefpassfiltern verbunden ist. Bei einer derartigen Schaltung liegt am Ausgang des (letzten) Tiefpassfilters die Spitzenspannung bzw. Amplitude des Wechselspannungsanteils an und kann somit direkt zur Ermittlung des zu messenden Stroms eingesetzt werden. Außerdem ist die so erhaltene Amplitude aufgrund der berücksichtigten Phasenlage zwischen Referenzsignal und Wechselspannungsanteil vorzeichenbehaftet, so dass die anliegende Spannung je nach Stromrichtung negativ oder positiv ist.

**[0022]** Eine besonders rasche Ermittlung der Stromrichtung (positives oder. negatives Vorzeichen) wird erreicht, wenn bei der eben geschilderten Messschaltung das Referenzsignal ein Rechtecksignal ist. Ein Rechtecksignal erzeugt bei der Modulation einen schnelleren und stärkeren Ausschlag, was beispielsweise in Verbindung mit einem den Tiefpassfiltern nachgeschalteten Komparator eine beschleunigte Registrierung von Stromrichtungsänderungen ermöglicht.

**[0023]** Damit die Messung des von der Wechselstromquelle gelieferten Wechselspannungsanteils nicht von externen Wechselströmen beeinflusst wird, ist es vorteilhaft, wenn die Frequenz der Wechselstromquelle verschieden von, insbesondere größer als, etwaige(n) dem Strom zwischen den Anschlüssen überlagerten) Frequenzen gewählt ist. Dies betrifft insbesondere Frequenzanteile, die beispielsweise aufgrund von gleichgerichteten Wechselspannungen aus einer Frequenz des Stromnetzes oder aufgrund von vorhersehbaren Drehzahlbereichen eines angeschlossenen Generators dem zu messenden Strom überlagert sein können. Zumeist kann für derartige Anteile eine Maximalfrequenz angegeben werden, so dass die Frequenz der Wechselstromquelle vorteilhaft mit einem Abstand oberhalb dieser Maximalfrequenz gewählt wird. Im Idealfall ist der Abstand zu etwaigen Störfrequenzen groß genug, dass ein geeigneter Bandpassfilter diese vollständig ausfiltern kann.

**[0024]** Die Erfindung wird nachfolgend anhand von besonders bevorzugten Ausführungsbeispielen, auf die sie jedoch nicht beschränkt sein soll, und unter Bezugnahme auf die Zeichnung noch weiter erläutert. In der Zeichnung zeigen dabei im Einzelnen:

**[0025]** **Fig. 1** ein schematisches Blockschaltbild einer einfachen Grundausführung einer Einrichtung zur Messung des Stroms durch einen Schalter mit unbekanntem Innenwiderstand;

**[0026]** **Fig. 2** ein schematisches Blockschaltbild einer Variante der erfindungsgemäßen Einrichtung mit einer Batterie und einem Generator;

**[0027]** **Fig. 3** ein schematisches Blockschaltbild einer weiteren Variante der erfindungsgemäßen Einrichtung mit einem zwei MOSFETs aufweisenden Schalter;

**[0028]** **Fig. 4** ein schematisches Blockschaltbild gemäß **Fig. 1**, jedoch mit detaillierter Darstellung der Signalverarbeitungselemente der Messschaltung;

**[0029]** **Fig. 5** eine Gruppe von Signalverläufen zur Darstellung des erfindungsgemäßen Verfahrens; und

**[0030]** **Fig. 6** eine andere Gruppe von Signalverläufen zur Darstellung einer weiteren Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens; und

**[0031]** **Fig. 7** eine weitere Gruppe von Signalverläufen zur Darstellung einer Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bestimmung der Richtung des Stroms.

**[0032]** In den Figuren und der folgenden Figurenbeschreibung erfolgt die Bezeichnung von Wechselströmen und Wechselspannungen immer mit Klein- und Großbuchstaben, wobei die Kleinbuchstaben i bzw. u für einen Wechselstrom bzw. eine Wechselspannung stehen und die Großbuchstaben I und U für die Amplitude des mit dem Kleinbuchstab bezeichneten Stroms bzw. der Spannung. Die Zuordnung zu Schaltungselementen oder -knoten erfolgt anhand der Indices der Buchstaben. Bei Gleichströmen und Gleichspannungen werden keine Kleinbuchstaben verwendet und die Großbuchstaben stehen in diesem Fall für arithmetische Mittelwerte, was bei einem perfekten Gleichstrom bzw. einer perfekten Gleichspannung der Amplitude gleichzusetzen ist.

**[0033]** Das in **Fig. 1** abgebildete schematische Blockschaltbild zeigt eine Einrichtung 1 mit einem Schalter 2 und zwei über den Schalter 2 verbundene Anschlüsse 3, 4. Parallel zum Schalter 2 ist ein Wechselstromkreis 5 geschaltet, der über den Schalter 2 geschlossen ist. Der Wechselstrom  $i_p$  im Wechselstromkreis 5 ist durch

eine Wechselstromquelle **6** bestimmt, wobei der von der Wechselstromquelle **6** erzeugte Wechselstrom  $I_p$  d. h. dessen Amplitude  $I_p$  und dessen Frequenz  $f_p$ , bekannt bzw. vorbestimmt sind. Außerdem ist eine Messschaltung **7** beiderseits mit dem Schalter **2** verbunden, welche zur Ermittlung der am Schalter **2** anliegenden Spannung  $u_s$  eingerichtet ist, wobei die ermittelte Gesamtspannung  $u_s$  bzw. deren zeitlicher Verlauf in einen Gleichspannungsanteil  $U_x$  und einen Wechselspannungsanteil  $u_p$  aufgetrennt wird. Der Schalter **2** arbeitet somit als Mess-Shunt, allerdings mit unbekanntem Widerstand  $R_s$ . Zur Ermittlung des zwischen den Anschlüssen **3**, **4** fließenden Stroms bzw. dessen Mittelwerts  $I_x$  ist die Messschaltung **7** mit einer Verarbeitungseinheit **8** verbunden, die den gesuchten Strom  $I_x$  aus dem bekannten Parameter der Wechselstromamplitude  $I_p$  und aus den gemessenen Spannungsanteilen  $U_x$ ,  $u_p$  bzw. der Amplitude  $U_p$  des Wechselspannungsanteils  $u_p$  ableitet, und zwar gemäß der Gleichung

(1)

$$I_x = I_p \cdot \frac{U_x}{U_p}$$

**[0034]** Eine Kenntnis des Innenwiderstands  $R_s$  des Schalters **2** ist dabei nicht erforderlich. Stattdessen genügt die Kenntnis der Wechselstromamplitude  $I_p$  und der Amplitude  $U_p$  des Wechselspannungsanteils  $u_p$ , über die der Schalter-Innenwiderstand  $R_s$  implizit bestimmt ist. Hierbei wird freilich vorausgesetzt, dass der Innenwiderstand  $R_s$  des Schalters **2** im Wesentlichen rein ohmscher Natur ist, d. h. dass der Schalter **2** eine vernachlässigbar geringen oder keinen Blindwiderstand aufweist. Aufgrund der im Wesentlichen gleichzeitigen Messung der den Spannungswerte  $U_x$ ,  $U_p$  ist das Ergebnis von etwaigen Änderungen bzw. Schwankungen des Innenwiderstands  $R_s$  unabhängig.

**[0035]** **Fig.** 2 zeigt eine Variante der Einrichtung **1**, wobei mit dem einen Anschluss **3** ein Generator **9**, der eine Spannung  $u_G$  abgibt, und mit dem anderen Anschluss **4** eine wiederaufladbare Batterie **10** verbunden ist. Sowohl mit dem Generator **9** als auch mit der Batterie **10** sind jeweils variable lokale Lasten **11**, **12** verbunden, so dass nur ein Teil des Generator- bzw. Batteriestroms über Reihen-Impedanzen **13**, **14** und den Schalter **2** fließt. Die Einrichtung **1** ist zur Bestimmung dieses Teilstroms  $I_x$  vorgesehen. Der Schalter ist mit einer Steuerungseinheit **15**, beispielsweise einem Schalt- bzw. Gatesignalgenerator **15**, verbunden. Die Steuerungseinheit **15** bestimmt die Schalter-Stellung bzw. steuert im Allgemeinen Veränderungen des Innenwiderstands  $R_s$  des Schalters **2**.

**[0036]** Der Wechselstromkreis **5** weist einen Ausschalter **17** auf, welcher eingerichtet ist, den Wechselstromkreis **5** unabhängig vom Schalter **2** zu unterbrechen bzw. zu öffnen. Wie in **Fig.** 2 außerdem ersichtlich, ist hier die Wechselstromquelle **5** über eine induktive Kopplung **16** mit dem eigentlichen Wechselstromkreis **5** verbunden. In diesem Fall ist der Ausschalter **17** besonders vorteilhaft, da er etwaige Gleichspannungsanteile des zu messenden Stroms  $I_x$  an einer Umgehung des Schalters **2** über den Wechselstromkreis **5** und die Induktivität **16** hindert.

**[0037]** **Fig.** 2 zeigt außerdem einen einfachen Aufbau der Messschaltung **7**. Dabei umfasst die Messschaltung **7** einen Differenzverstärker **18**, einen Tiefpassfilter **19** und einen Bandpassfilter **20**. Die beiden Filter **19**, **20** sind jeweils mit dem Ausgang des Differenzverstärkers **18** verbunden. Der Differenzverstärker **18** ist ein einfaches Mittel, um absolute Spannungsschwankungen im Strom  $I_x$  zu eliminieren, und bringt nötigenfalls die zu messenden Spannungsdifferenzen in den Arbeitsbereich der beiden Filter **19**, **20**.

**[0038]** Bei der in **Fig.** 3 dargestellten Variante sind beispielhaft ein detaillierter Aufbau des Schalters **2** und des Gatesignalgenerators **15** gezeigt. Der Schalter **2** weist hierbei zwei in Reihe geschaltete Halbleiter-Schalter **21**, **22**, bevorzugt MOSFETs, auf. Zur Veränderung des Innenwiderstands  $R_s$  der beiden Halbleiter-Schalter **21**, **22** ist eine Gatespannungsquelle **23** zwischen Source (bzw. Bulk) und Gate beider Schalter **21**, **22** geschaltet. Die von der Gatespannungsquelle **23** angelegte Spannung  $u_g$  bestimmt somit den Innenwiderstand  $R_s$  des Schalters **2**. Dabei ist die Gatespannungsquelle **23** mit einem Gatesignalschalter **24** verbunden, welcher die Gatespannungsquelle **23** entweder mit einem gepulsten Gatesignalgenerator **25** mit Taktgeber **26** oder mit einem statischen Gatesignalgenerator **27** verbindet. Es können mit dem Gatesignalschalter **24** auch bevorzugt zumindest zwei statische Gatesignalgeneratoren **27** verbunden sein, so dass eine Auswahl von zwei verschiedenen konstanten Innenwiderständen des Schalters **2** möglich ist. Wenn die Gatespannungsquelle **23** mit dem gepulsten Gatesignalgenerator **25** verbunden ist, oszilliert die Gatespannung und somit der Innenwiderstand  $R_s$  des Schalters **2** entsprechend dem gepulsten Signal. Wenn die Pulsfrequenz der gepulsten Gatespannungsquelle **25** mit der Frequenz des Wechselstroms im Wesentlichen übereinstimmt, was durch die Verbindungsleitung **29** angedeutet sein soll, kann auch ein im Wesentlichen konstanter Strom  $I_x$  (d. h. bei ausgeschaltetem

Wechselstromkreis **5**) in einem Wechselspannungsanteil  $U_p$  in der Messschaltung **7** resultieren, weil die Filter **19, 20** der Messschaltung **7** in diesem Fall das durch die modulierte Gatespannung erzeugte Signal aus den übrigen Spannungsschwankungen herausfiltern, so dass der ermittelte Wechselspannungsanteil  $U_p$  proportional zur Widerstandsänderung im Schalter **2** ist.

**[0039]** Wie durch die Verknüpfung **29** in **Fig. 3** angedeutet, ist es vorteilhaft, den Wechselstromkreis **5** bei Verwendung des gepulsten Gatesignalgenerators **25** auszuschalten. Zu diesem Zweck sind für den Ausschalter **17** zwei Stellungen vorgesehen: in der ersten, in **Fig. 3** abgebildeten geschlossenen Stellung führt der Wechselstromkreis **5** über den Schalter **2**, so dass der Wechselstrom  $i_p$  dem zu messenden Strom  $I_x$  überlagert ist; in der zweiten, geöffneten Stellung trennt der Ausschalter **17** den Schalter **2** vom Wechselstromkreis **5**, so dass nur der zu messende Strom  $I_x$  durch den Schalter **2** fließt. Der Gatesignalschalter **24** und der Ausschalter **17** werden zwecks einfacher Synchronisation im dargestellten Beispiel beide von einer gemeinsamen Betriebswahleinheit **30** gesteuert. Die Betriebswahleinheit **30**, welche in der Praxis beispielsweise mit einer übergeordneten Ablaufsteuerung der Messung verbunden ist, schaltet zwischen einem Betriebsmodus mit konstantem Schalterwiderstand (vgl. z. B. **Fig. 6**, Intervall zwischen  $t_0$  und  $t_2$ ) und einem Betriebsmodus mit periodisch wechselndem Schalterwiderstand (vgl. **Fig. 6**, Intervall zwischen  $t_2$  und  $t_x$ ) um. Dazu ist die Betriebswahleinheit **30** über Steuerleitungen **30a, 30b** mit Steuereingängen des Ausschalters **17** und des Gatesignalschalters **24** verbunden, so dass ein von der Betriebswahleinheit **30** ausgehendes Signal (vgl. **Fig. 6g**) gleichzeitig entweder ein Ausschalten des Wechselstromkreises **5** und eine Verbindung der Gatespannungsquelle **23** mit dem gepulsten Gatesignalgenerator **25** oder ein Einschalten des Wechselstromkreises **5** und eine Verbindung der Gatespannungsquelle **23** mit dem statischen Gatesignalgenerator **27** erzielt.

**[0040]** Wie in **Fig. 1** bereits durch die Verarbeitungseinheit **8** angedeutet, kann die erfindungsgemäße Einrichtung eine Reihe von Verarbeitungselementen aufweisen, wobei eine bevorzugte Ausführungsform eines Teils der Verarbeitungseinheit **8** neben der Messschaltung **7** in **Fig. 4** ausführlicher dargestellt ist. Die bereits vorstehend ausführlich besprochenen Grundelemente der Einrichtung **1**, nämlich der Schalter **2** mit den An schlüssen **3, 4** und dem Wechselstromkreis **5** samt Wechselstromquelle **6**, sind in **Fig. 4** zur leichteren Orientierung vereinfacht (vgl. **Fig. 1**) dargestellt. Ähnlich wie in **Fig. 2** ist ein Differenzverstärker **18** zur Ermittlung und Verstärkung der am Schalter **2** abfallenden Spannung vorgesehen; mit dem Ausgang des Differenzverstärkers **18** sind ein Tiefpassfilter **19** und – parallel dazu – zwei in Reihe geschaltete identische Bandpassfilter **20', 20''** verbunden. Am Ausgang des zweiten Bandpassfilters **20''** liegt somit eine Wechselspannung  $u_p$  entsprechend dem Wechselspannungsanteil der am Schalter **2** abfallenden Spannung  $u_s$  an.

**[0041]** Zur Ermittlung des Spannungsquotienten aus Gleichspannungs- und Wechselspannungsanteil (s. Gl. 1) ist es erforderlich, die Amplitude  $U_p$  der Wechselspannung  $u_p$  möglichst genau zu bestimmen. Dies wird bei der in **Fig. 4** dargestellten Anordnung durch eine Lock-in-Verstärker-Schaltung **31** erzielt, wobei die Wechselspannung  $u_p$  in einem Multiplizierer **32** mit einem Referenzsignal aus einem Signalgenerator **33** moduliert wird. Das Referenzsignal ist eine Wechselspannung mit derselben Frequenz wie jene der Wechselstromquelle **6** bzw. des Taktgebers **26** des Gatesignalgenerators **25**. Das so modulierte Signal durchläuft anschließend z. B. zwei in Reihe geschaltete Tiefpassfilter **34, 34'**. (Gegebenenfalls kann auch ein Tiefpassfilter höherer Ordnung eingesetzt werden.) Vor der Ausgabe wird die am zweiten Tiefpassfilter **34'** anliegende Spannung zur Verstärkung in einem weiteren Multiplizierer **35** mit einer konstanten Gainspannung **36** multipliziert. Am Ausgang des Multiplizierers **35** liegt somit die Amplitude bzw. Spitzenspannung  $U_p$  des Wechselspannungsanteils  $u_p$  an.

**[0042]** Die aus der gerade beschriebenen Verstärker-Schaltung **31** erhaltene Amplitude  $U_p$  ist vorzeichenbehaftet und lässt somit Rückschlüsse auf die Stromrichtung des zu messenden Stroms  $I_x$  zu.

**[0043]** Falls der Strom  $I_x$  sehr gering wird – und insbesondere, wenn man die Stromrichtung sehr rasch feststellen muss – ist die Erkennung auf Basis der Amplitude  $U_p$  der Wechselspannung  $u_p$  jedoch unzureichend, da das Signal-Rausch-Verhältnis zu gering wird bzw. die Zeitkonstante des Tiefpasses sich ungünstig auswirkt. In **Fig. 4** ist daher für eine rasche und eindeutige Bestimmung der Stromrichtung eine zusätzliche, geringfügig abgeänderte Verstärker-Schaltung **37** parallel zur Verstärker-Schaltung **31** vorgesehen. Diese wiederum als Lock-in-Verstärker ausgebildete Schaltung **37** verwendet hierbei ein rechteckiges Referenzsignal, welches von einem Rechtecksignalgeber **38** erzeugt wird. Mit dem Ausgang eines Multiplizierers **39**, der die Wechselspannung  $u_p$  sowie das Referenzsignal zugeführt erhält, sind wiederum zwei in Reihe geschaltete Tiefpassfilter **40, 40'** verbunden. Die am Ausgang des zweiten Tiefpassfilters **40'** anliegende Spannung wird anschließend in einem weiteren Multiplizierer **41** mit einer höheren Gainspannung **42** als zuvor beschrieben verstärkt. Der Multiplizierer **41** ist schließlich mit einem Diskriminator **43** verbunden, der ein zweiwertiges Richtungssignal  $\text{sign}(U_p)$  ausgibt, welches zur raschen Stromrichtungserkennung herangezogen werden kann.

**[0044]** Zur Berechnung des Ergebnisses  $I_{res}$  der Strommessung bildet eine Berechnungseinheit **8'**, die ebenfalls Teil der Verarbeitungseinheit **8** ist, den Quotienten der Spannungsamplituden  $U_x$  und  $U_p$  und multipliziert diesen mit der bekannten Amplitude  $I_p$  des Wechselstroms  $i_p$ .

**[0045]** Die prinzipielle Funktionsweise der vorliegenden Erfindung soll anhand des in **Fig. 5** dargestellten zeitlichen Ablaufs im Detail erläutert werden. Die Abbildung umfasst sieben Zeilen bzw. Plots a)–g) von Zeitkurven verschiedener Parameter der Einrichtung bzw. von Signalverläufen, welche anhand einer Schaltungssimulation ermittelt wurden. **Fig. 5a** zeigt den Spannungsverlauf an den beiden Anschlüssen **3**, **4**. Die Spannung  $u_G$  am ersten, beispielsweise mit einem Generator verbundenen, Anschluss **3** schwankt sägezahnförmig mit einer bestimmten Generatorfrequenz  $f_G$ . Diese Spannungsschwankungen werden häufig – so auch im Folgenden – als Ripple bezeichnet, welcher durch eine Ripplefrequenz  $f_R$  und eine Rippleamplitude  $A_R$  charakterisiert ist. Die Spannung  $u_B$  an dem zweiten, beispielsweise mit einer Batterie **10** verbundenen, Anschluss **4** ist hingegen im Wesentlichen konstant, was durch die durchgezogene Linie dargestellt ist. Während eines ersten Zeitabschnitts **44** ist die Spannung  $u_G$  am ersten Anschluss **3** höher als die Spannung  $u_B$  am zweiten Anschluss **4**, so dass ein Strom  $I_x$  vom ersten Anschluss **3** zum zweiten Anschluss **4** fließt. Dieser Strom  $I_x$  ist in **Fig. 5b** aufgetragen, wobei der Verlauf des Stroms  $I_x$  durch die Spannungsdifferenz ( $u_G - u_B$ ) bestimmt ist und somit dieselbe Struktur wie die Spannung  $u_G$  am ersten Anschluss **3** aufweist. Zu einem Zeitpunkt  $t_x$  kehren sich die Spannungsverhältnisse um und die Spannung  $u_B$  am zweiten Anschluss **4** übersteigt nun die Spannung  $u_G$  am ersten Anschluss **3**. Demzufolge wechselt auch die Stromrichtung, was durch einen Vorzeichenwechsel im zweiten Zeitabschnitt **44'** in **Fig. 5b** dargestellt ist.

**[0046]** **Fig. 5c** zeigt parallel zu **Fig. 5a** und **Fig. 5b** den zeitlichen Verlauf des Gleichspannungsanteils  $U_x$ , d. h. des Mittelwerts der am Schalter **2** abfallenden Spannung  $u_s$  ( $U_x = \text{avg}(u_s)$ ). Die Mittelung findet dabei in einem Tiefpassfilter **19** statt, wodurch die in **Fig. 5a** ersichtlichen Spannungsschwankungen geglättet werden. Allerdings verursacht der Tiefpassfilter **19** eine Verzögerung **45** bei Spannungsänderungen, z. B. beim Wechsel zum Zeitpunkt  $t_x$ , so dass die mittlere Spannung erst nach einer Übergangsperiode **45** gegen den aktuellen Mittelwert bzw. den Gleichspannungsanteil  $U_x$  konvergiert.

**[0047]** Wie vorstehend bereits mehrfach erläutert, wird dem zu messenden Strom  $I_x$ , dessen Verlauf in **Fig. 5b** gezeigt ist, ein Wechselstrom  $i_p$  aus einer eigens vorgesehenen Wechselstromquelle **6** überlagert. Der somit durch den Schalter **2** fließende Gesamtstrom ( $i_s = I_x + i_p$ ) ändert die am Schalter **2** abfallende Spannung  $u_s$ . In **Fig. 5d** ist der Wechselspannungsanteil  $u_p$  einer solchen Überlagerung gezeigt. Die Frequenz  $f_p$  des überlagerten Wechselstroms  $i_p$  beträgt in diesem Beispiel etwa das Fünffache der Ripplefrequenz  $f_R$ . Die sichtbare Abweichung des Wechselspannungsanteils  $u_p$  von einer gleichmäßigen Schwingung ist durch den Ripple des Stroms  $I_x$  begründet (vgl. **Fig. 5a**). Da die Spannungsschwankungen aufgrund des Ripples ungefähr in derselben Größenordnung sind wie die von der Wechselstromquelle **6** hervorgerufene Wechselspannung, sind die Abweichungen klar erkennbar.

**[0048]** **Fig. 5e** zeigt den Verlauf der Gatespannung  $u_g$ . Die durchgezogene Linie entspricht einer konstanten Gatespannung  $U_g$  und folglich einem im Wesentlichen konstanten Innenwiderstand  $R_s$  des Schalters **2**, welcher in dem Beispiel, vergleichbar der in **Fig. 3** dargestellten Einrichtung, einen MOSFET aufweist. Dies entspricht einer von einem statischen Gatesignalgenerator **27** gesteuerten Gatespannungsquelle **23**.

**[0049]** Der zeitliche Verlauf der Amplitude  $U_p$  des in **Fig. 5d** dargestellten Wechselspannungsanteils  $u_p$  ist in **Fig. 5f** gezeigt. Diese Amplitude  $U_p$  kann beispielsweise mit der in **Fig. 4** gezeigten Einrichtung **1** ermittelt werden. Trotz des verwendeten Tiefpassfilters **34**, **34'** wirken sich hier weiterhin „Überbleibsel“ des Strom-Ripples aus, so dass die dargestellte Amplitude  $U_p$  gegenüber der tatsächlichen konstanten Amplitude des von der Wechselstromquelle **6** erzeugten Wechselstroms  $i_p$  leicht verfälscht ist. Vergleichbar mit dem Tiefpassfilter **19** zur Spannungsmittelung verursachen auch die hier eingesetzten Tiefpassfilter **34**, **34'** eine Verzögerung **46** beim Umschalten der Stromrichtung des Stroms  $I_x$ . Unmittelbar nach dem Umschaltzeitpunkt  $t_x$  sinkt die Amplitude  $U_p$  signifikant ab und konvergiert erst nach einer Übergangsperiode **46** wieder zu demselben mehr oder minder stabilen Verlauf von vor dem Umschalten.

**[0050]** Aus den dargestellten Signalverläufen für den Gleichspannungsanteil  $U_x$  und die Wechselspannung  $u_p$  bzw. deren Amplitude  $U_p$  kann – unter Berücksichtigung der während der Signalverarbeitung eingesetzten Verstärkungsfaktoren – der über den Schalter **2** fließende Strom  $I_x$  gemäß der oben angegebenen Gleichung (1) berechnet werden. Der zeitliche Verlauf des Ergebnisses  $I_{res}$  dieser Berechnung ist in **Fig. 5g** dargestellt, wobei hervorzuheben ist, dass der Wert des Innenwiderstands  $R_s$  des Schalters **2** für die Berechnung  $I_{res}$  des gesuchten Stroms  $I_x$  (d. h.  $I_{res} = I_x$ ) nicht explizit verwendet wurde. Die mehrfache Filterung der Signale

bewirkt zwar eine Verzögerung beim Umschalten der Stromrichtung und verzerrt die Form des Ripples, gibt aber ansonsten den Verlauf des Stroms  $I_x$  im Wesentlichen korrekt wieder.

**[0051]** Wenn der Strom  $I_x$  klein wird, steigt der Messfehler. Um die Genauigkeit und Auflösung zu verbessern, kann daher bei Unterschreiten eines gewissen gemessenen Stroms auf ein mehrstufiges Verfahren umgestiegen werden. **Fig. 6** illustriert in diesem Zusammenhang die Signalverläufe bei einem verbesserten dreistufigen Verfahren. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Innenwiderstand  $R_s$  des Schalters **2** zwar unbekannt, aber gezielt steuerbar und insbesondere eine periodische Widerstandsänderung möglich ist, vgl. **Fig. 3**.

**[0052]** In **Fig. 6** zeigt im Detail **Fig. 6a** die Spannung  $u_G$ ,  $u_B$  an den beiden Anschlüssen **3**, **4** der vorliegenden Einrichtung **1**; **Fig. 6b** stellt schematisch den zeitlichen Ablauf des in diesem Beispiel dreistufigen Verfahrens dar, wobei die erste Stufe dem Abschnitt A zwischen  $t_0$  und  $t_1$ , die zweite Stufe dem Abschnitt B zwischen  $t_1$  und  $t_2$  und die dritte Stufe dem Abschnitt C zwischen  $t_2$  und  $t_x$  entspricht. Der darauf folgende, d. h. zum Zeitpunkt  $t_x$  beginnende Abschnitt C' unterscheidet sich von Abschnitt C durch eine Änderung der Messgröße (vgl. **Fig. 6a**), nicht jedoch des Messvorgangs; **Fig. 6c** zeigt den Verlauf des Wechselstroms  $i_p$  im Wechselstromkreis **5**; **Fig. 6d** zeigt sowohl den zu messenden Strom  $I_x$  als auch den Gesamtstrom  $i_s$ , der über den Schalter **2** fließt; **Fig. 6e** zeigt den Zustand einer Betriebswahleinheit **30** (vgl. **Fig. 3**); **Fig. 6f** veranschaulicht den Verlauf der Gatespannung  $u_g$  am Schalter **2**; **Fig. 6g** bzw. **Fig. 6h** illustrieren den Gleichspannungsanteil  $U_x$  der am Schalter abfallenden Spannung bzw. die Wechselspannung  $u_p$  und **Fig. 6i** zeigt die ermittelte Amplitude  $U_p$  der Wechselspannung  $u_p$ .

**[0053]** Die drei Stufen oder Abschnitte A, B, C des hier dargestellten Verfahrens werden hintereinander durchlaufen, wobei die Reihenfolge nicht maßgeblich ist. Zum Zeitpunkt  $t_x$  wird die Richtung des Stromes  $I_x$  umgekehrt (vgl. **Fig. 6a**). Es kann eine beliebige andere Reihenfolge gewählt werden. Wichtiger als die Reihenfolge ist die zeitliche Nähe der Schritte, da der Verfahrensablauf günstiger Weise schnell gegenüber eventuellen Veränderungen der Umgebungsparameter ist. In den Plots in **Fig. 6** ist die erste Stufe A zwischen den Zeitpunkten  $t_0$  und  $t_1$  (bei auf der Abszissenachse aufgetragener Zeit), die zweite Stufe B zwischen  $t_1$  und  $t_2$  und die dritte Stufe C zwischen  $t_2$  und  $t_x$  abgebildet. Der zwischen den Anschlüssen **3**, **4** fließende Strom  $I_x$  ist während des gesamten Vorgangs – von  $t_0$  bis  $t_x$  – im Wesentlichen gleich (vgl. **Fig. 6a**), abgesehen von einem Ripple. Die ersten beiden Stufen (zwischen  $t_0$  und  $t_2$ ) unterscheiden sich von der dritten Stufe (zwischen  $t_2$  und  $t_x$ ) insbesondere dadurch, dass die Wechselstromquelle **6** während der dritten Stufe inaktiv ist. Daher fließt zwischen den Zeitpunkten  $t_2$  und  $t_x$  kein Strom im Wechselstromkreis **5** ( $i_p = 0$ ).

**[0054]** Während der ersten beiden Stufen werden zwei verschiedene Gatespannungen  $U_{g0}$ ,  $U_{g1}$  (vgl. **Fig. 6f**) an den Schalter **2** angelegt. Die beiden Gatespannungen bewirken zwei verschiedene Innenwiderstände  $R_{s0}$  und  $R_{s1}$  des Schalters **2**, was zu entsprechenden Veränderungen der Wechselspannung  $u_p$  führt. Die Veränderung (vgl. **Fig. 6h** und **Fig. 6i**) besteht darin, dass die Amplitude  $U_p$  der Wechselspannung  $u_p$  während der zweiten Stufe B geringfügig kleiner ist als während der ersten Stufe A, da der zweite Schalter-Innenwiderstand  $R_{s1}$  kleiner ist als der erste Schalter-Innenwiderstand  $R_{s0}$ . Weil der Wechselstrom  $i_p$  bzw. dessen Amplitude  $I_p$  diesem Beispiel größer ist als der Strom  $I_x$  zwischen den Anschlüssen **3**, **4**, wird die Wechselspannung  $u_p$  während der ersten beiden Verfahrensstufen vom Einfluss der Wechselstromquelle **6** dominiert, d. h. es sind kaum Abweichungen vom gleichmäßig periodischen Verlauf erkennbar. Die Auswirkungen des rechteckigen Wechselstroms  $i_p$  zeigen sich auch im über den Schalter fließenden Strom  $i_s$  (vgl. **Fig. 6d**), wobei ein rechteckiger Anteil dem Strom  $I_x$  mit sägezahnförmigem Ripple überlagert ist. Für die vorliegende Messung relevant sind während dieser beiden Stufen insbesondere die während der ersten Stufe bzw. der zweiten Stufe gemessenen Amplituden  $U_{p0}$  bzw.  $U_{p1}$  des Wechselspannungsanteils  $u_p$ , bzw. eigentlich deren Differenz, d. h. die Änderung  $\Delta U_p = U_{p0} - U_{p1}$  der Amplitude  $U_p$  des Wechselspannungsanteils  $u_p$  bei Änderung der Gatespannung  $u_g$  am Schalter **2**.

**[0055]** Während der dritten Stufe C wird die Wechselstromquelle **6** vollständig deaktiviert und gegebenenfalls der Wechselstromkreis **5** geöffnet, so dass lediglich der zu messende Strom  $I_x$  über den Schalter **2** fließt. Außerdem wird nun die Gatespannungsquelle **23** mit einem periodischen Gatesignalgenerator **25** verbunden, so dass die Gatespannung  $u_g$  und somit der Innenwiderstand  $R_s$  des Schalters **2** periodisch zwischen den während der beiden vorangehenden Stufen angenommenen Werten  $R_{s0}$  und  $R_{s1}$  umschaltet. Der Innenwiderstand  $R_s$  des Schalters **2** muss jedoch weiterhin zu keinem Zeitpunkt bekannt sein. Der Schalter **2** sollte geeignet sein, der Frequenz der wechselnden Gatespannung  $u_g$  zu folgen, so dass die beim periodischen Wechsel erreichten Widerstände im Wesentlichen den konstanten Widerständen  $R_{s0}$  und  $R_{s1}$  während der ersten beiden Verfahrensstufen entsprechen. Die Wechsel-Frequenz der Gatespannung  $u_g$  ist vorteilhaft gleich der Frequenz  $f_p$  des von der Wechselstromquelle **6** während der ersten beiden Stufen A, B erzeugten Wechselstroms  $i_p$ , so dass die durch Widerstandsvariation erzeugte Wechselspannung  $u_p$  (bei gleichbleibendem Strom  $I_x$ ) von den-

selben Filtern wie der zuvor überlagerte Wechselstrom  $i_p$  verarbeitet werden kann. Aufgrund des wechselnden Schalterinnenwiderstands  $R_s$  ist der von der Messschaltung 7 ermittelte Wechselspannungsanteil  $U_p$  nicht Null, wie es die abgeschaltete Wechselstromquelle 6 vermuten lassen würde, sondern entspricht der bei vorgegebenem Strom  $I_x$  und wechselndem Widerstand  $R_s$  am Schalter 2 abfallenden Wechselspannung  $u_p$  (vgl. Fig. 6h zwischen  $t_2$  und  $t_x$ ). Eine gültige Schätzung des Wechselspannungsanteils  $U_{p2}$  pendelt sich allerdings aus bereits mehrfach genannten Gründen erst nach einer kurzen Einschwingzeit 48 nach dem Abschalten der Wechselstromquelle 6 zum Zeitpunkt  $t_2$  ein. Die dann ermittelte Amplitude  $U_{p2}$  des Wechselspannungsanteils  $u_p$  entspricht der Spannungsänderung  $\Delta U_x$  bei konstantem Strom  $I_x$  ( $\Delta U_x - U_{p2}$ ) und wechselndem Widerstand. Aus dieser Spannungsänderung  $\Delta U_x$  und der Änderung  $\Delta U_p$  der Amplitude des Wechselspannungsanteils bei aktiver Wechselstromquelle 6 und verschiedenen konstanten Gatespannungen  $U_{g0}$ ,  $U_{g1}$  und somit verschiedenen Schalterwiderständen  $R_{s0}$  und  $R_{s1}$  kann nunmehr der gesuchte Strom  $I_x$  gemäß der folgenden Gleichung errechnet werden:

$$I_x = I_p \cdot \frac{\Delta U_x}{\Delta U_p} , \quad (2)$$

wobei

$$\Delta U_x = I_x \cdot R_{s0} - I_x \cdot R_{s1} \text{ und } \Delta U_p = U_{p0} - U_{p1} = I_p \cdot R_{s0} - I_p \cdot R_{s1} . \quad (3)$$

**[0056]** Wie in Fig. 6a ersichtlich, bleibt der Strom  $I_x$  während der dritten Stufe C von der Wechselstromquelle 6 unbeeinflusst. Vorübergehende Stromspitzen 47 werden aber, wenn auch indirekt, von dem wechselnden Innenwiderstand  $R_s$  erzeugt: beim Umschalten vom größeren Widerstand  $R_{s0}$  zum kleineren Widerstand  $R_{s1}$  ist eine nach oben, zu größeren Stromwerten weisende Stromspitze erkennbar und beim Umschalten vom kleineren Widerstand  $R_{s1}$  zum größeren Widerstand  $R_{s0}$  ist eine nach unten, zu kleineren Stromwerten weisende Stromspitze erkennbar.

**[0057]** Zum Zeitpunkt  $t$ , d. h. in diesem Beispiel nach der dritten und letzten Verfahrensstufe C und zu Beginn des Abschnitts C', wechselt auch beim in Fig. 6 dargestellten Verlauf die Richtung des Stroms  $I_x$ . Eine unmittelbare Nachmessung mit den beiden konstanten Gatespannungen  $U_{g0}$ ,  $U_{g1}$  ist jedoch nicht zwingend notwendig. Auch beim Umschalten der Stromrichtung benötigt die erfundungsgemäße Einrichtung eine kurze Einschwingperiode 49, insbesondere was den Gleichspannungsanteil  $U_x$  (Fig. 6g) und die Amplitude  $U_p$  des Wechselspannungsanteils  $u_p$  (Fig. 6i) betrifft. Hier kann es zu einem kurzfristigen Überschwingen kommen, welche auf die meist in den Tiefpassfiltern gespeicherte Energie zurückzuführen ist. Wenn die Dauer der Einschwingperiode 49 für die jeweilige Anwendung akzeptabel ist, reicht die Ermittlung des Gleichspannungsanteils  $U_x$  zur Erkennung der Stromrichtung aus.

**[0058]** Die in Fig. 7 gezeigten Signalverläufe illustrieren eine Variante des erfundungsgemäßen Verfahrens, welche eine vergleichsweise rasche Erkennung der Stromrichtung bzw. eines Wechsels der Stromrichtung erlaubt. Die dargestellte Situation entspricht ungefähr dem Übergang zwischen den Abschnitten C und C' in Fig. 6 (vgl. Fig. 6b) mit dem Wechsel der Stromrichtung zum Zeitpunkt  $t_x$ . Dabei zeigt im Detail Fig. 7a die Spannung  $u_G$ ,  $u_B$  an den beiden Anschlüssen 3, 4 der vorliegenden Einrichtung 1; Fig. 7b zeigt den Strom  $I_x$ , dessen Richtung zu bestimmen ist; Fig. 7c zeigt die Wechselspannung  $u_p$ ; Fig. 7d veranschaulicht den Verlauf einer Referenzspannung  $u_r$ , deren Form, Frequenz  $f_p$  und Phasenlage mit der Gatespannung  $u_g$  am Schalter 2 (vgl. Fig. 6f) übereinstimmt; und Fig. 7e illustriert sowohl den Gleichspannungsanteil  $U_x$  der am Schalter abfallenden Spannung als auch das Richtungssignal  $\text{sign}(U_p)$  (vgl. Fig. 4).

**[0059]** Wie im Zusammenhang mit der Verstärker-Schaltung 37 (vgl. Fig. 4) bereits erläutert, wird die Wechselspannung  $u_p$  zur Richtungsbestimmung mit einem bevorzugt rechteckigen Referenzsignal  $u_r$  multipliziert. Aufgrund der abrupt geänderten Phasenlage der Wechselspannung  $u_p$  zum Zeitpunkt  $t_x$  (vgl. Fig. 7c), ändert das Produkt aus Wechselspannung  $u_p$  und (unverändertem) Referenzsignal  $u_r$  bereits innerhalb der ersten Halbperiode der beiden Signale (d. h. des Referenzsignals  $u_r$  und der Wechselspannung  $u_p$ ), jedenfalls aber deutlich rascher als der ebenfalls in Fig. 7e dargestellte Gleichspannungsanteil  $U_x$ , des Vorzeichen. Die Änderungsgeschwindigkeit des Gleichspannungsanteils  $U_x$  wird von der Zeitkonstante des Tiefpassfilters vorgegeben.

**[0060]** An den gestrichelten Hilfslinien in Fig. 7 ist die relative Phasenlage zwischen Wechselspannung  $u_p$  und Referenzsignal  $u_r$  vor und nach dem Stromrichtungswechsel zum Zeitpunkt  $t_x$  ablesbar. Das umgekehr-

te Vorzeichen des Richtungssignals  $\text{sign}(U_p)$  gegenüber dem Gleichspannungsanteil  $U_x$  ergibt sich aus der Phasengleichheit von Gatespannung  $u_g$  und Referenzsignal  $u_r$ . Zur einfacheren Nutzung kann in der Praxis des Richtungssignal invertiert ausgegeben werden oder es kann alternativ zwischen Gütespannung und Referenzsignal eine Phasenverschiebung von  $180^\circ$  vorgesehen sein.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung eines Stroms ( $I_x$ ) durch einen Schalter (2) mit unbekanntem Innenwiderstand ( $R_s$ ), der zwei Anschlüsse (3, 4) aufweist, wobei eine Spannungsdifferenz ( $u_s$ ) an dem Schalter gemessen wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass mit Hilfe einer Wechselstromquelle (6), die Teil eines parallel zum Schalter (2) geschalteten Wechselstromkreises (5) ist, wobei sowohl Amplitude ( $I_p$ ) als auch Frequenz ( $f_p$ ) des von der Wechselstromquelle (6) gelieferten Stroms ( $i_p$ ) bekannt sind, im Betrieb dem zumessenden Strom ( $I_x$ ) durch den Schalter (2) der von der Wechselstromquelle gelieferte Strom ( $i_p$ ) überlagert wird; dass ein Wechselspannungsanteil ( $U_p$ ) der Spannungsdifferenz ( $u_s$ ) und dessen Amplitude ( $U_p$ ) als maximaler Spannungswert ermittelt wird; und dass der Strom ( $I_x$ ) zwischen den Anschlüssen (3, 4) proportional zur Amplitude ( $I_p$ ) des Stroms ( $i_p$ ) der Wechselstromquelle (6) ermittelt und ausgegeben wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei neben dem Wechselspannungsanteil ( $U_p$ ) ein Gleichspannungswert ( $U_x$ ) der Spannungsdifferenz ( $u_s$ ) ermittelt wird und der Strom ( $I_x$ ) zwischen den Anschlüssen (3, 4) aus der Amplitude ( $I_p$ ) des Stroms ( $i_p$ ) der Wechselstromquelle (6) und dem Verhältnis der ermittelten Spannungswerte ( $U_x, U_p$ ) ermittelt und ausgegeben wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Schalter (2) ein Halbleiter-Schalter ist, der mit einem Gatesignalgenerator (15) zur Steuerung eines Schalterwiderstands ( $R_s$ ) verbunden ist, wobei der von der Wechselstromquelle gelieferte Strom ( $i_p$ ) unterbrochen, der Schalterwiderstand ( $R_s$ ) von dem Gatesignalgenerator (15) periodisch, vorzugsweise mit der Frequenz ( $f_p$ ) der Wechselstromquelle (6), moduliert und ein weiterer Wechselspannungsanteil ( $U_{p2}$ ) der Spannungsdifferenz ( $u_s$ ) ermittelt wird, wobei der Strom ( $I_x$ ) zwischen den Anschlüssen (3, 4) proportional zum Produkt der Amplitude ( $I_p$ ) des Stroms ( $i_p$ ) der Wechselstromquelle (6) und des weiteren Wechselspannungsanteils ( $U_{p2}$ ) ermittelt und ausgegeben wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass
  - a) eine erste Einstellung des Schalterwiderstands ( $R_s$ ) gewählt wird;
  - b) ein erster Wechselspannungsanteil ( $U_{p0}$ ) der Spannungsdifferenz ( $u_s$ ) ermittelt wird;
  - c) eine zweite Einstellung des Schalterwiderstands ( $R_s$ ) gewählt wird;
  - d) ein zweiter Wechselspannungsanteil ( $U_{p1}$ ) der Spannungsdifferenz ( $u_s$ ) ermittelt wird;
  - e) die Wechselstromquelle (6) deaktiviert wird;
  - f) der Schalterwiderstand ( $R_s$ ) von dem Gatesignalgenerator (15) periodisch, entsprechend einem Rechtecksignal, zwischen der ersten und der zweiten Einstellung umgeschaltet wird, vorzugsweise mit der Frequenz ( $f_p$ ) der Wechselstromquelle (6);
  - g) ein dritter Wechselspannungsanteil ( $U_{p2}$ ) der Spannungsdifferenz ( $u_s$ ) ermittelt wird;
  - h) der Strom ( $I_x$ ) zwischen den Anschlüssen (3, 4) aus einem Maximalstrom der Wechselstromquelle (6) und dem Verhältnis des dritten Wechselspannungsanteils ( $U_{p2}$ ) und der Differenz ( $\Delta U_p$ ) aus erstem und zweitem Wechselspannungsanteil ( $U_{p0}, U_{p1}$ ) ermittelt und ausgegeben wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein entweder durch Überlagerung eines Wechselstroms ( $i_p$ ) oder durch Modulation des Schalterwiderstands ( $R_s$ ) hervorgerufener Wechselspannungsanteil ( $U_p$ ) der Spannungsdifferenz ( $u_s$ ) mit einem Referenzsignal ( $u_r$ ) multipliziert wird und die Stromrichtung anhand des Vorzeichens ( $\text{sign}(U_p)$ ) des Produktsignals ermittelt und ausgegeben wird, wobei vorzugsweise das Referenzsignal ( $u_r$ ) die gleiche Frequenz ( $f_p$ ) wie der Wechselstrom ( $i_p$ ) respektive der Schalterwiderstand ( $R_s$ ) aufweist.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Frequenz ( $f_p$ ) der Wechselstromquelle (6) und gegebenenfalls des Gatesignalgenerators (15) verändert wird, sobald ungünstige Frequenzkomponenten im Strom ( $I_x$ ) zwischen den Anschlüssen (3, 4) erkannt werden.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Schalter (2) ausgeschaltet wird, wenn der ermittelte Strom ( $I_x$ ) größer als ein vorbestimmter Grenzwert ist.
8. Einrichtung (1) zur Messung eines Stroms ( $I_x$ ) durch einen Schalter (2) mit unbekanntem Innenwiderstand ( $R_s$ ), der zwei Anschlüsse (3, 4) aufweist, insbesondere nach dem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1

bis 7, mit einer Messschaltung (7) zur Ermittlung der an dem Schalter (2) anliegenden Spannung ( $u_s$ ), **dadurch gekennzeichnet**, dass parallel zum Schalter (2) ein Wechselstromkreis (5) mit einer Wechselstromquelle (6), die einen Wechselstrom ( $i_p$ ) mit bekannter Amplitude ( $I_p$ ) und bekannter Frequenz ( $f_p$ ) liefert, geschaltet ist, wobei im Betrieb der Wechselstrom ( $i_p$ ) dem zu messenden Strom ( $I_x$ ) durch den Schalter (2) überlagert ist, und die Messschaltung (7) zur Ermittlung eines Wechselspannungsanteils ( $u_p$ ) der an dem Schalter anliegenden Spannung ( $u_s$ ) eingerichtet ist.

9. Einrichtung (1) nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Messschaltung (7) zumindest einen Bandpassfilter (20) zur Ermittlung eines Wechselspannungsanteils ( $u_p$ ) der an dem Schalter (2) anliegenden Spannung ( $u_s$ ) aufweist.

10. Einrichtung (1) nach Anspruch 8 oder 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Messschaltung (7) zur Ermittlung eines Gleichspannungsanteils ( $U_x$ ) der an dem Schalter anliegender Spannung ( $u_s$ ) eingerichtet ist.

11. Einrichtung (1) nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Messschaltung (7) zumindest einen Tiefpassfilter (19) zur Ermittlung eines Gleichspannungsanteils ( $U_x$ ) der an dem Schalter (2) anliegenden Spannung ( $u_s$ ) aufweist.

12. Einrichtung (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Messschaltung (7) einen Differenzverstärker (18) zur Verstärkung der an dem Schalter (2) anliegenden Spannung ( $u_s$ ) aufweist.

13. Einrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Schalter (2) ein Halbleiter-Schalter ist, der mit einem Gatesignalgenerator (15) zur Steuerung eines Schalterwiderstands ( $R_s$ ) verbunden ist.

14. Einrichtung (1) nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Gatesignalgenerator (15) einen Gatespannungsschalter (24) mit zumindest zwei und bevorzugt drei Schaltzuständen aufweist, wobei jedem Schaltzustand ein unterschiedlicher Schalterwiderstand ( $R_s$ ) zugeordnet ist.

15. Einrichtung (1) nach Anspruch 13 oder 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Gatesignalgenerator (15) einen Taktgeber (26) zum zeitgesteuerten, periodischen Umschalten zwischen zumindest zwei unterschiedlichen Gatespannungen ( $U_{g1}, U_{g2}$ ) aufweist.

16. Einrichtung (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Ausschalter (17) zum Öffnen des Wechselstromkreises (5) vorgesehen ist.

17. Einrichtung (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Wechselstromquelle (6) über eine induktive Kopplung (16) mit dem übrigen Wechselstromkreis (5) verbunden ist.

18. Einrichtung (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass mit einem der Anschlüsse (4) des Schalters (2) eine Batterie (10) und mit dem anderen Anschluss (3) ein Stromgenerator (9), insbesondere eine Lichtmaschine, verbunden ist.

19. Einrichtung (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Schalter (2) zumindest einen Feldeffekttransistor mit isoliertem Gate, insbesondere zumindest einen MOSFET, aufweist.

20. Einrichtung (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Messschaltung (7) mit einer Verarbeitungseinheit (8) verbunden ist, wobei die Verarbeitungseinheit (8) einen Multiplizierer (32, 39) zum Modulieren des Wechselspannungsanteils ( $u_p$ ) mit einem periodischen Referenzsignal aufweist, wobei die Frequenz des Referenzsignals im Wesentlichen gleich der Frequenz ( $f_p$ ) des von der Wechselstromquelle (6) erzeugten Wechselstroms ( $i_p$ ) ist und wobei der Ausgang des Multiplizierers (32, 39) mit einem Tiefpassfilter (34, 40) oder mehreren in Reihe geschalteten Tiefpassfiltern (34, 34', 40, 40') verbunden ist.

21. Einrichtung (1) nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Referenzsignal ein Rechtecksignal ist.

22. Einrichtung (**1**) nach einem der Ansprüche 8 bis 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Frequenz ( $f_p$ ) der Wechselstromquelle (**6**) verschieden von, insbesondere größer als etwaige(n) dem Strom ( $I_x$ ) zwischen den Anschlüssen (**3, 4**) überlagerte(n) Frequenzen gewählt ist.

Es folgen 12 Seiten Zeichnungen

## Anhängende Zeichnungen

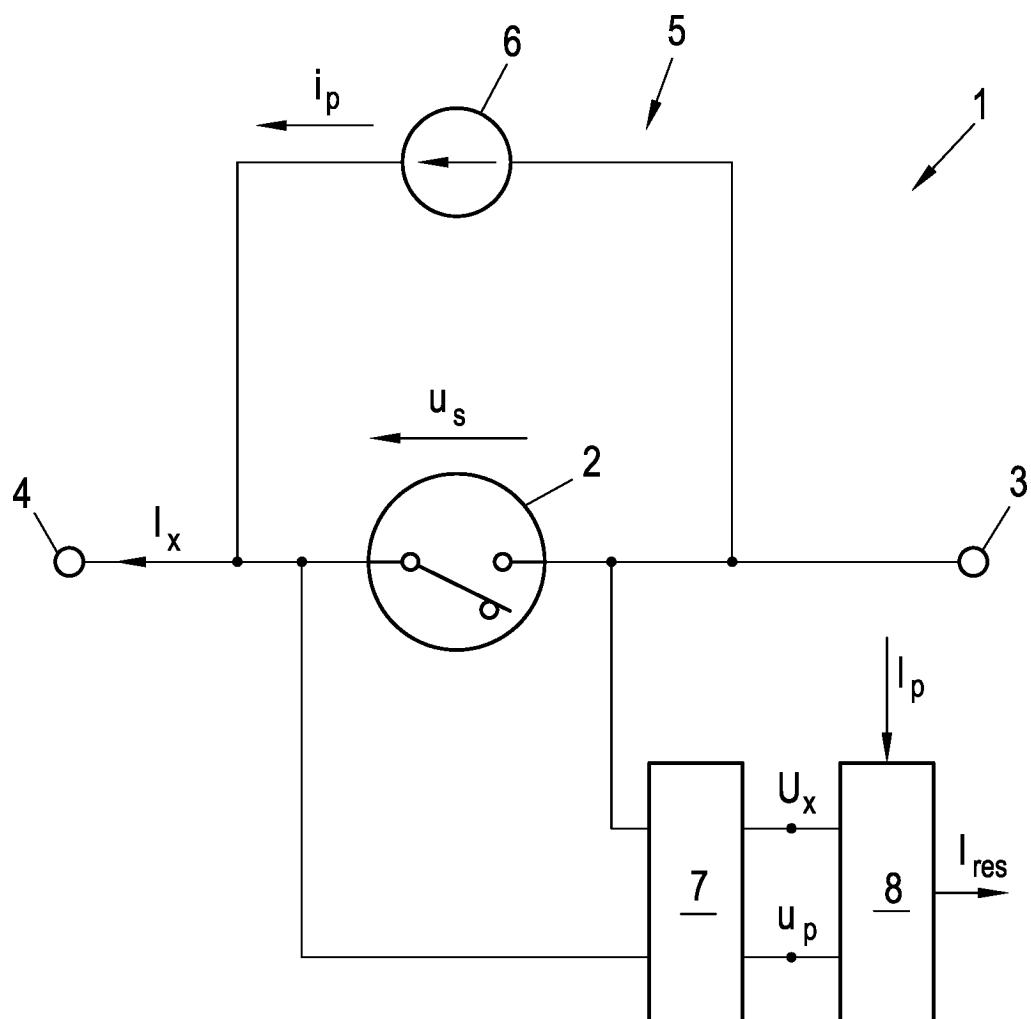


Fig. 1

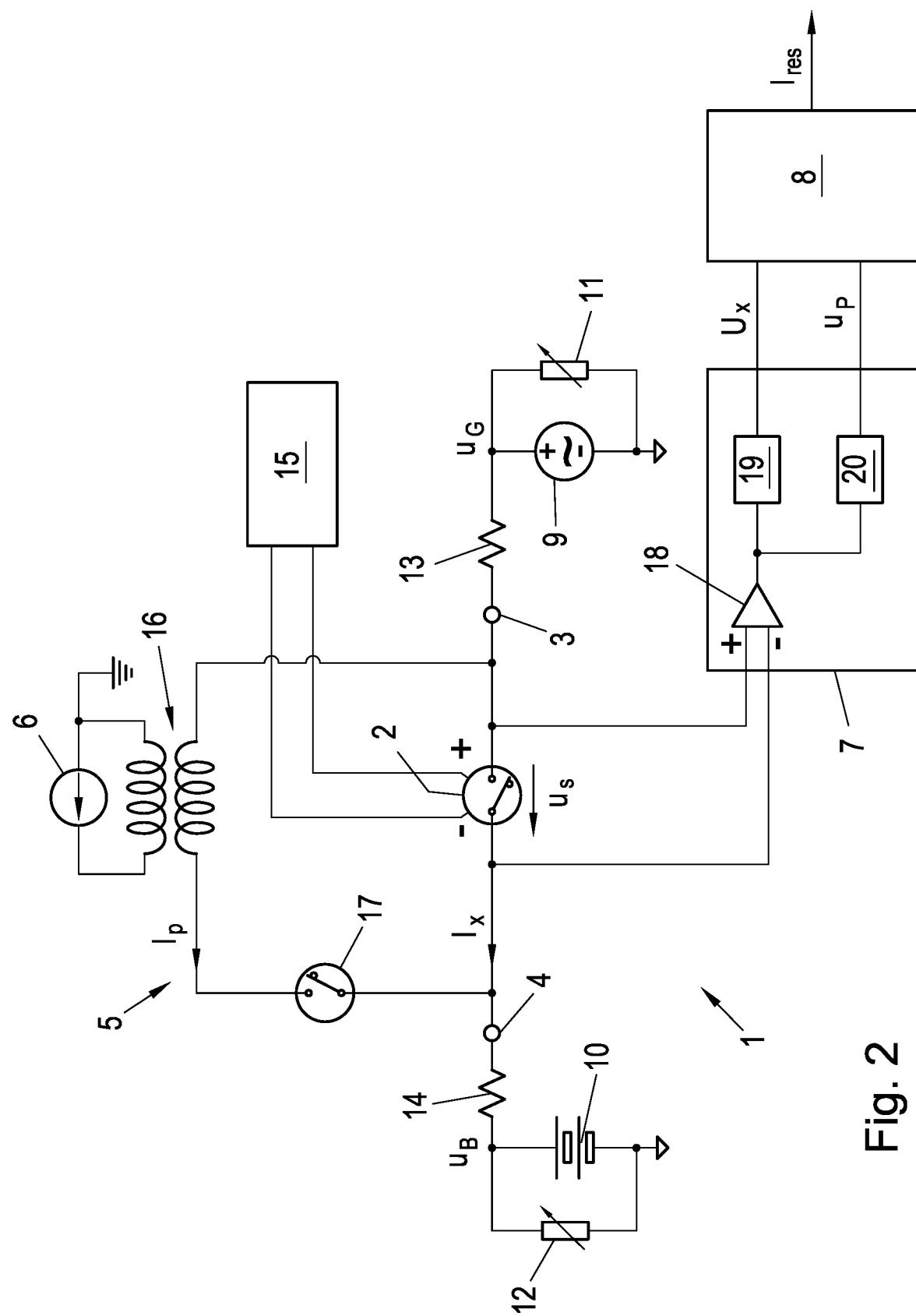


Fig. 2

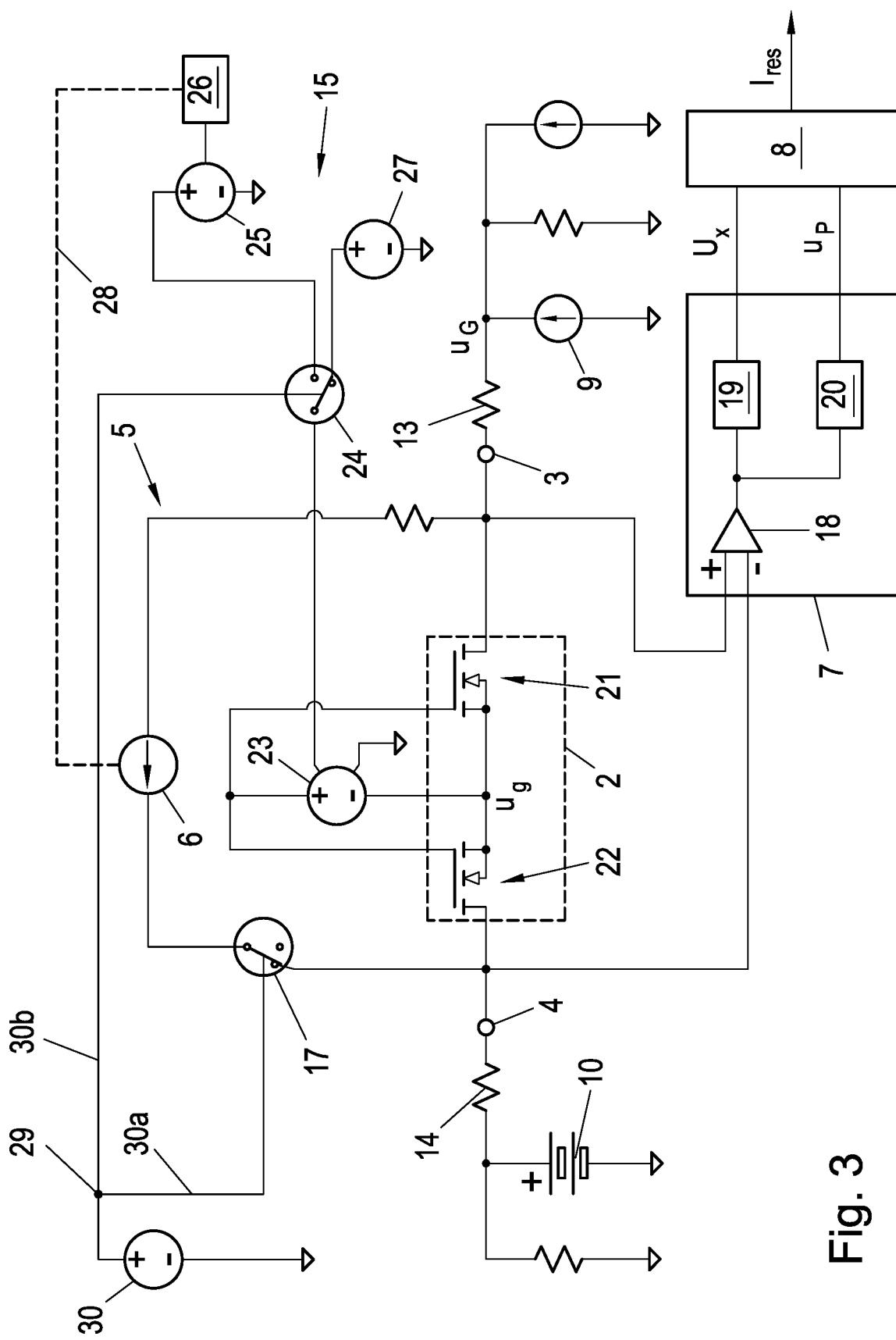


Fig. 3

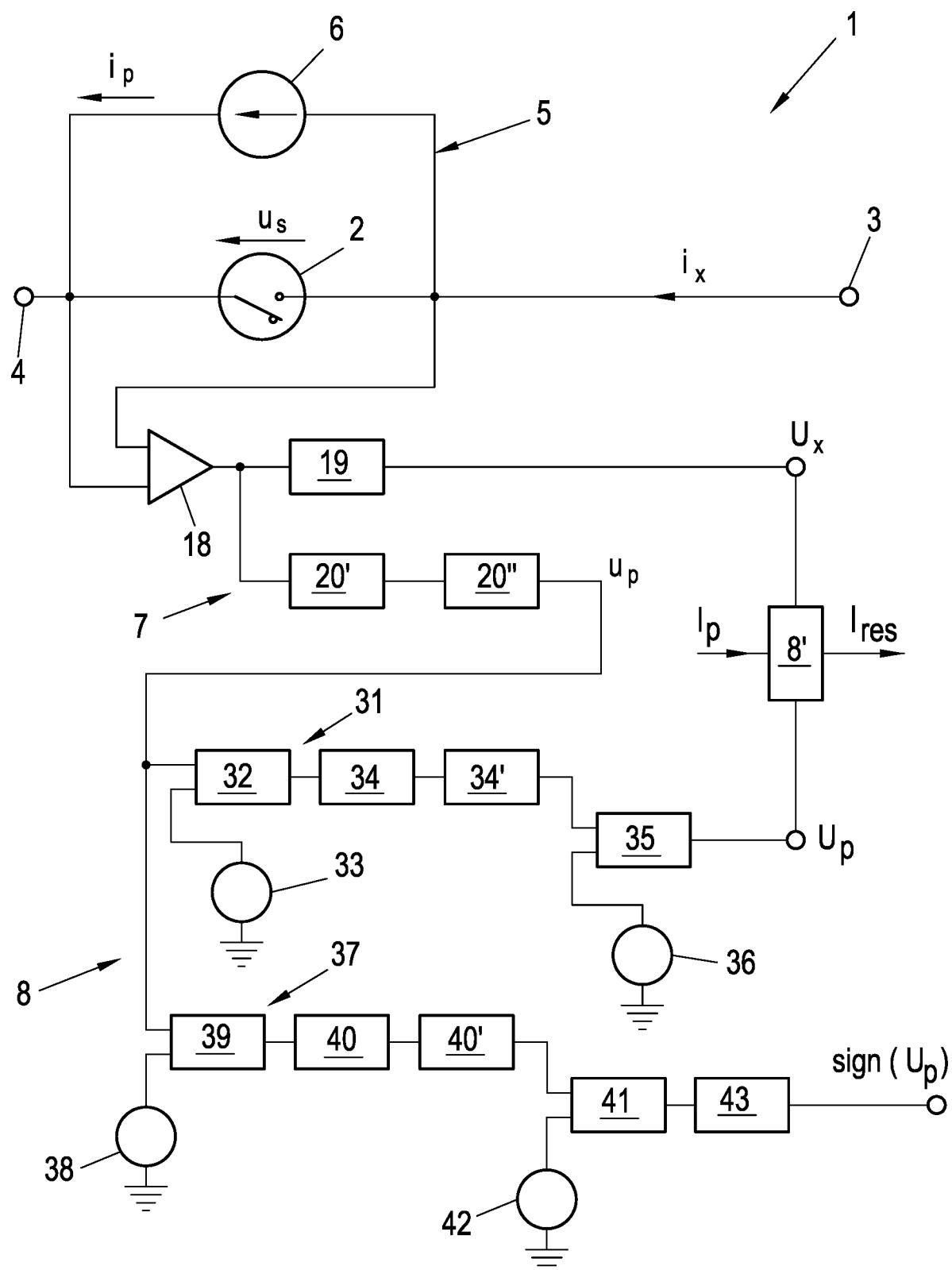


Fig. 4

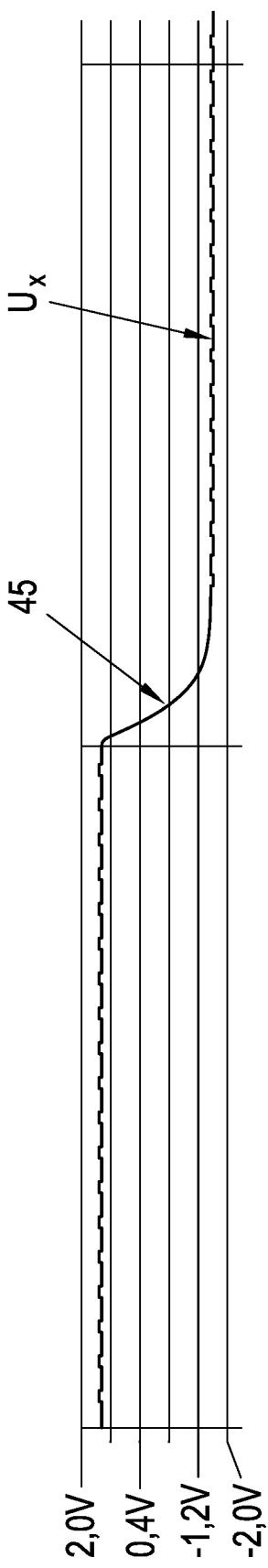
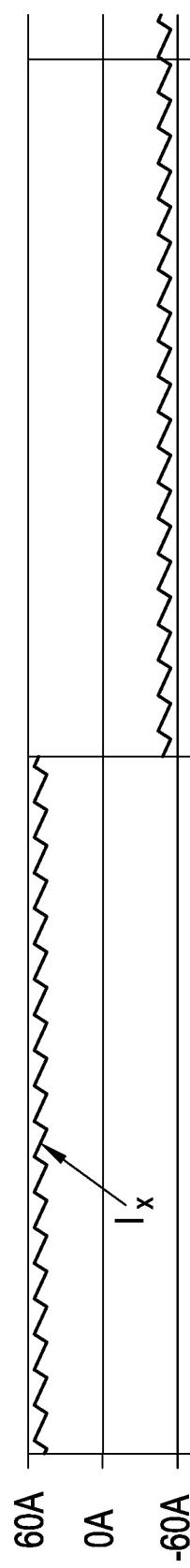
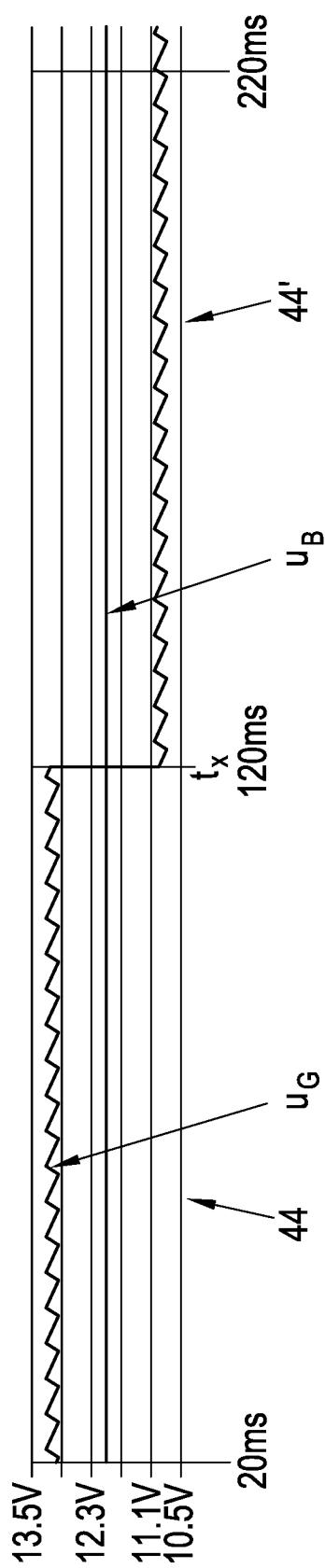
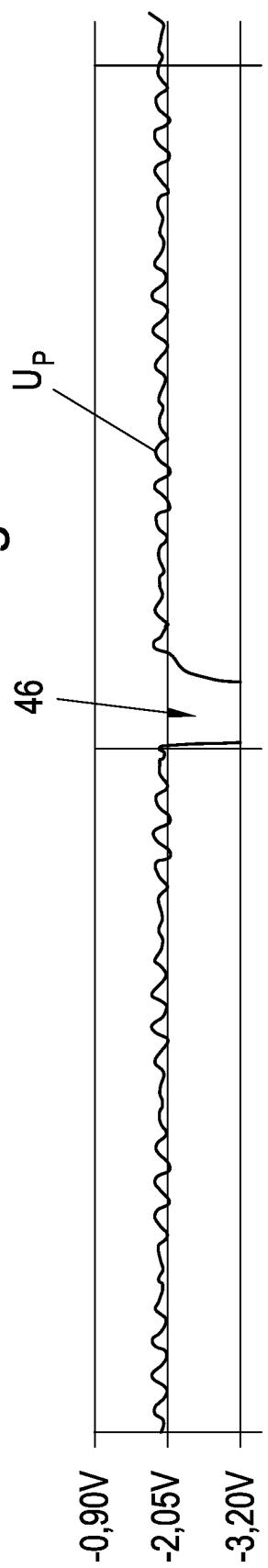
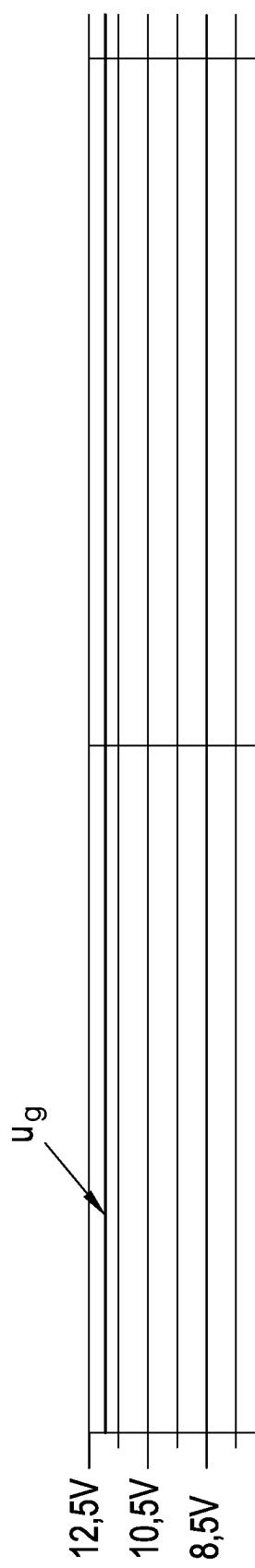
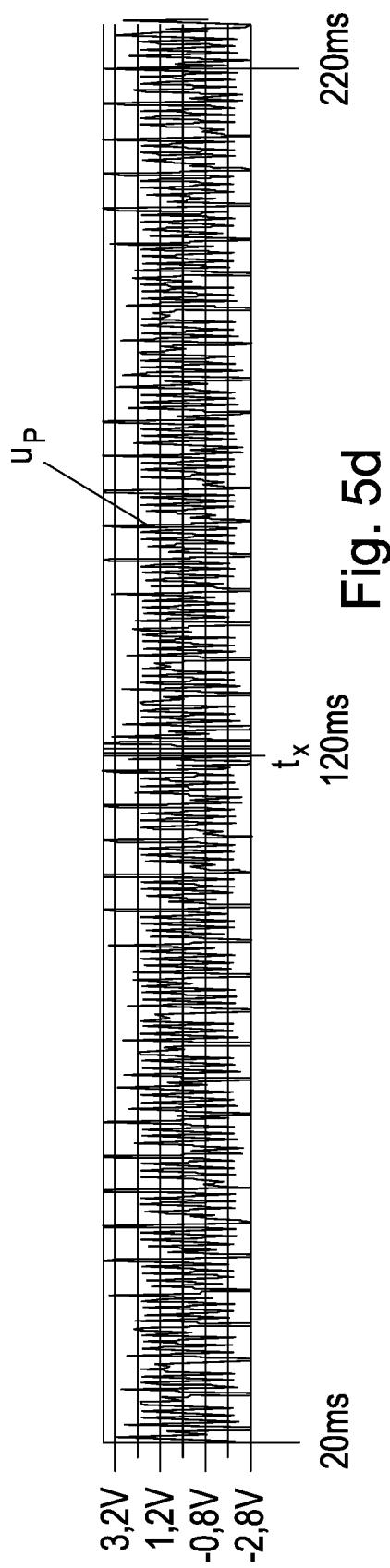


Fig. 5



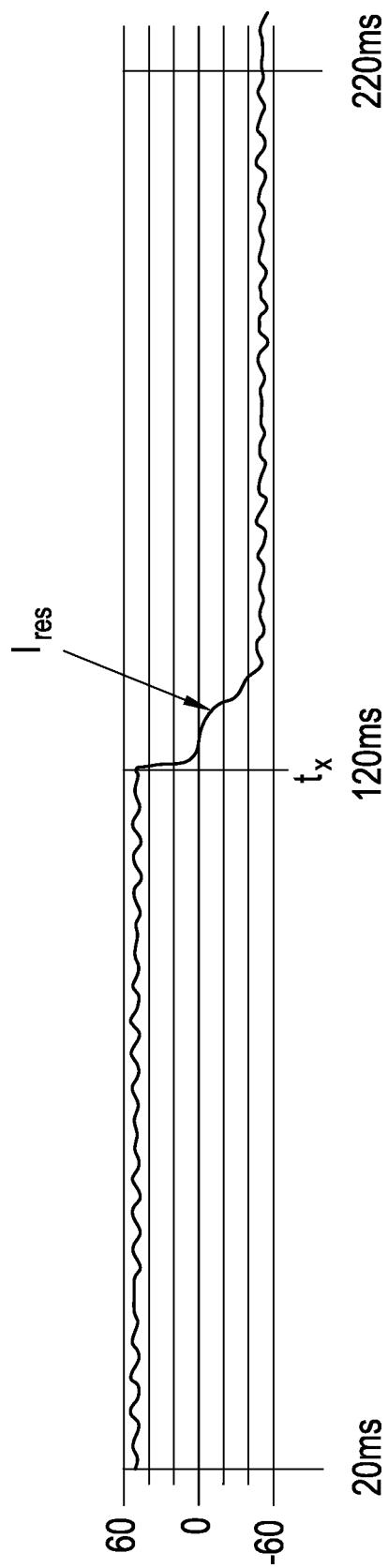


Fig. 5g

Fig. 5

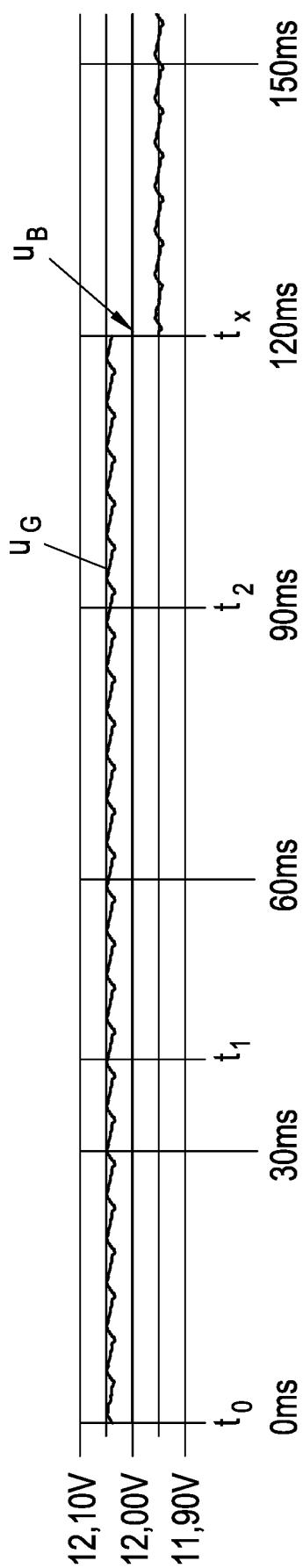


Fig. 6a

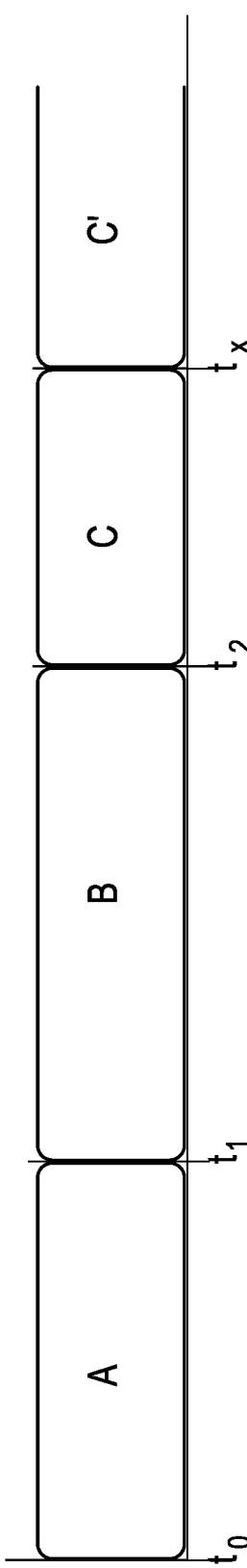


Fig. 6b

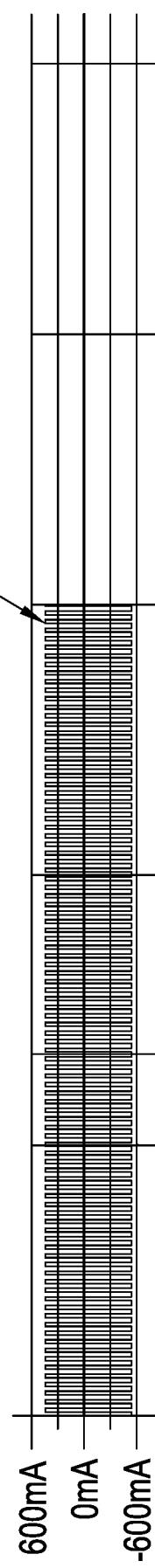
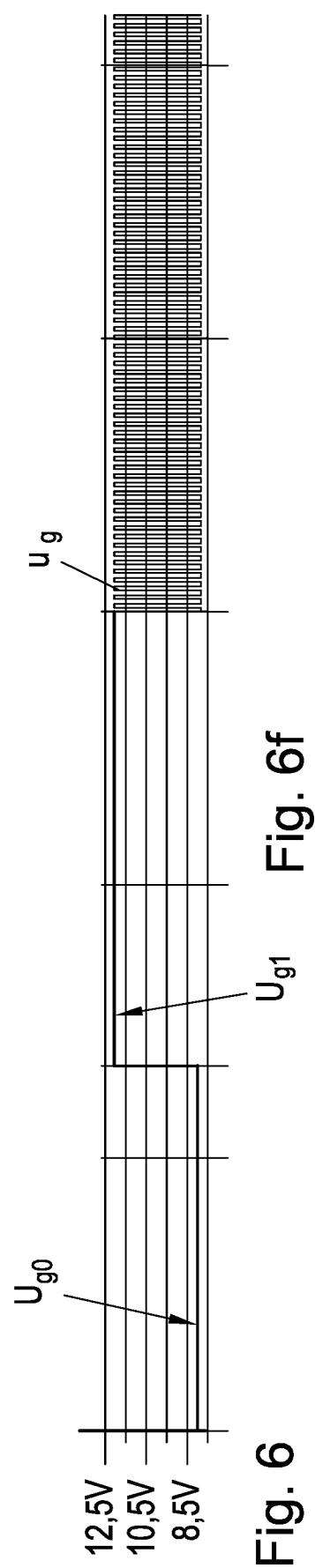
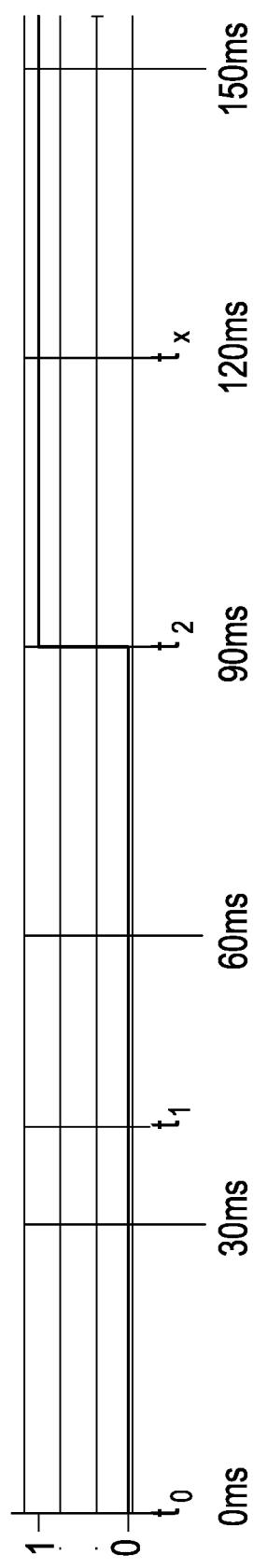
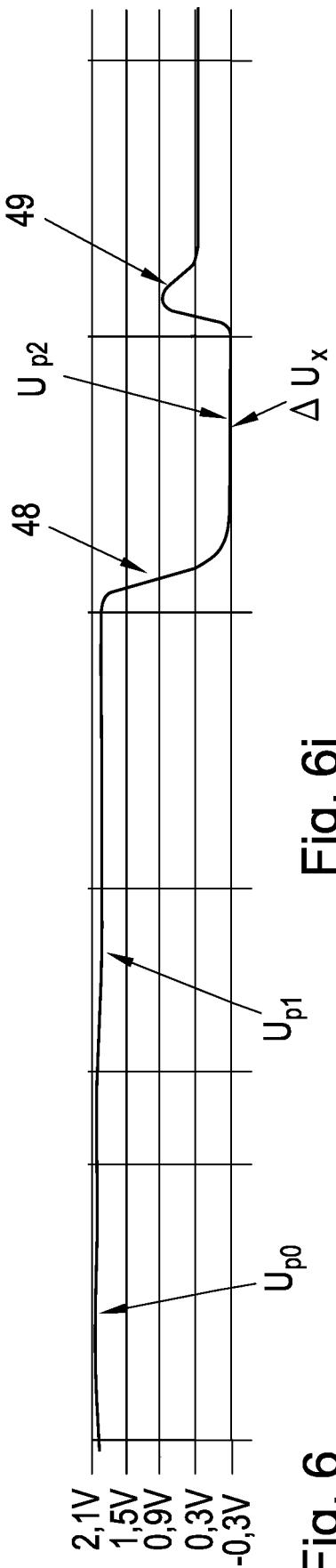
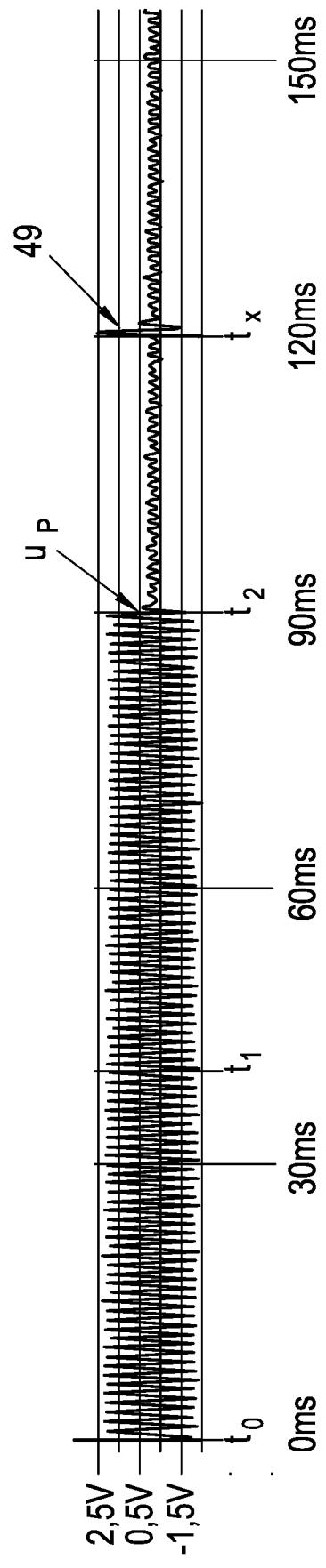
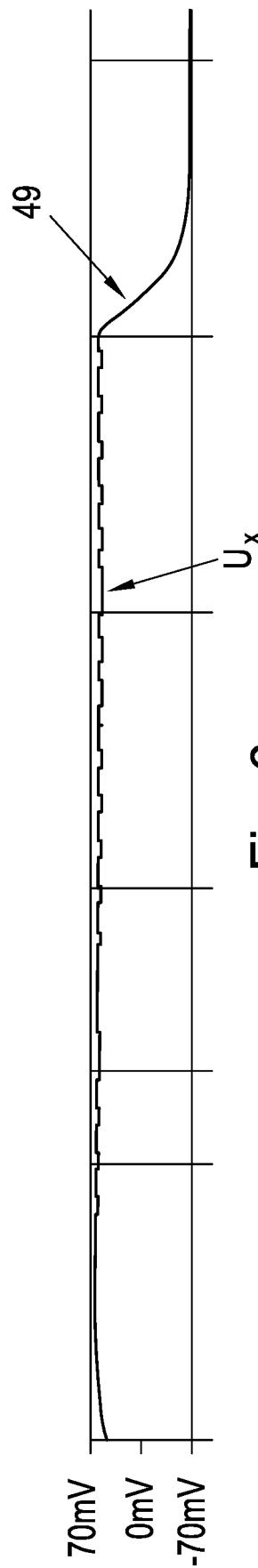


Fig. 6c

Fig. 6





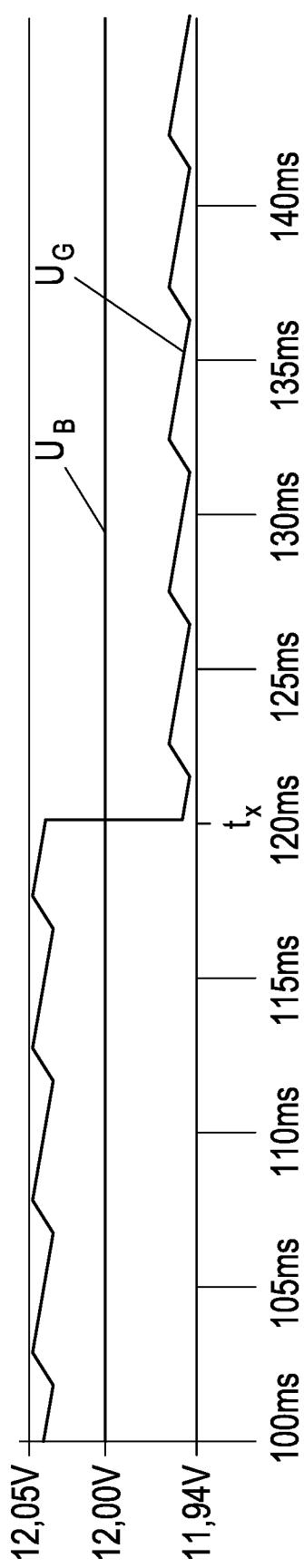


Fig. 7a

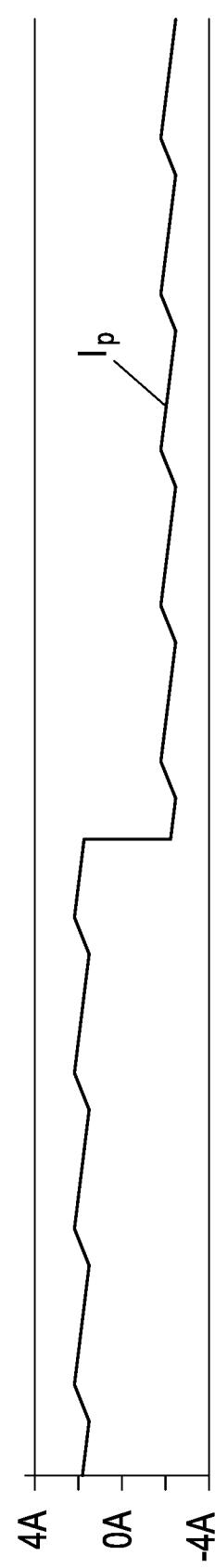


Fig. 7b

Fig. 7

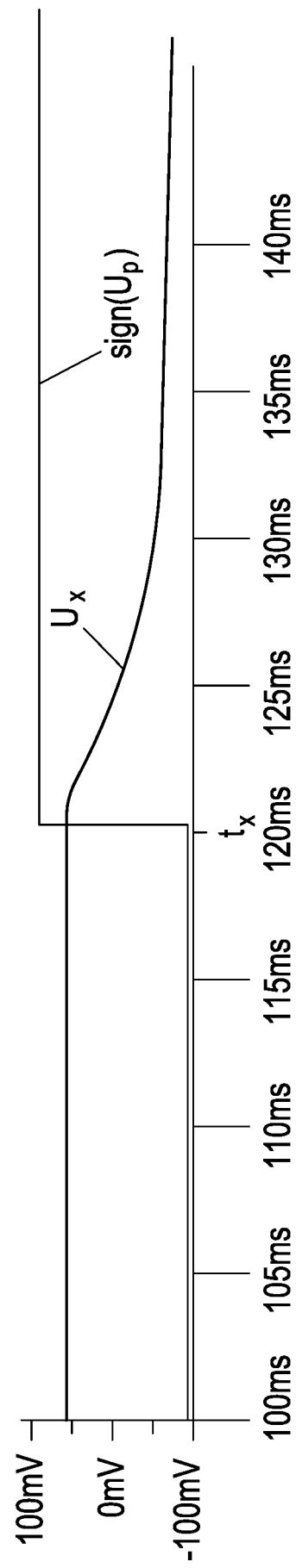
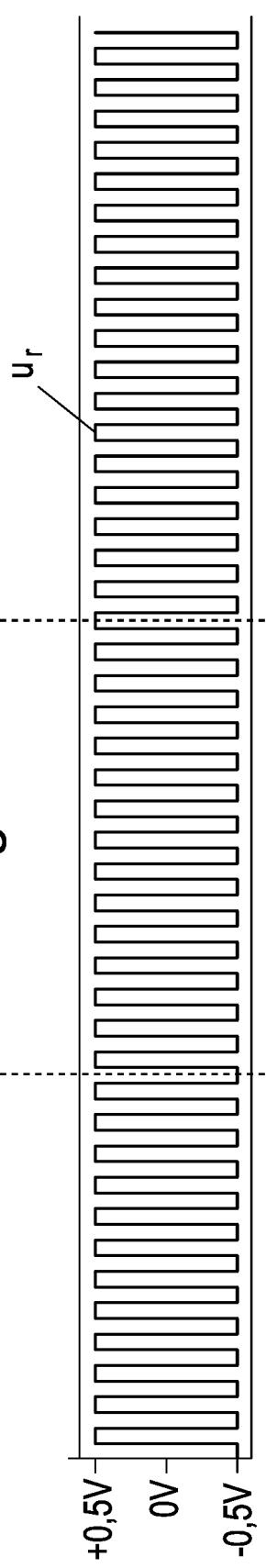
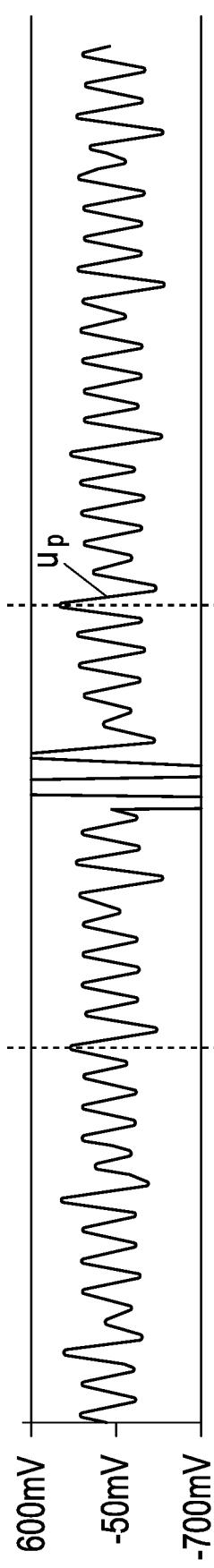


Fig. 7