(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
18. März 2010 (18.03.2010)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2010/028736 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
H02P 6/18 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2009/005965

(22) Internationales Anmeldedatum:
18. August 2009 (18.08.2009)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2008 047 094.5
12. September 2008 (12.09.2008) DE
10 2009 014 264.9 20. März 2009 (20.03.2009) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US)*: **BROSE FAHRZEUGTEILE GMBH & CO. KOMMANDITGESELLSCHAFT, HALLSTADT** [DE/DE]; Max Brose Strasse 2, 96103 Hallstadt (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: **KNEZEVIC, Jovan** [DE/DE]; Ottostrasse 18a, 96047 Bamberg (DE). **ÜBEL, Wolfgang** [DE/DE]; Weinberg 5, 96479 Weidramsdorf (DE). **FUCHS, Thorsten** [DE/DE]; Hopfenleithe 1, 95349 Thurnau (DE). **RUSS, Detlef** [DE/DE]; Lindenberg 1, 96237 Ebersdorf (DE). **DIESTLER, Stefan** [DE/DE]; Dürrbrunn-Kolmhof 15, 91364 Unterleinleiter (DE).

(74) Anwalt: **FREIER, Rüdiger**; Tergau & Pohl, Mögeldorfer Hauptstraße 51, 90482 Nürnberg (DE).

(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR PROCESSING A MOTOR SIGNAL OF A DC MOTOR, HAVING CURRENT RIPPLES

(54) Bezeichnung : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR VERARBEITUNG EINES STROMRIPPEL AUFWEISENDEN MOTORSIGNALS EINES GLEICHSTROMMOTORS

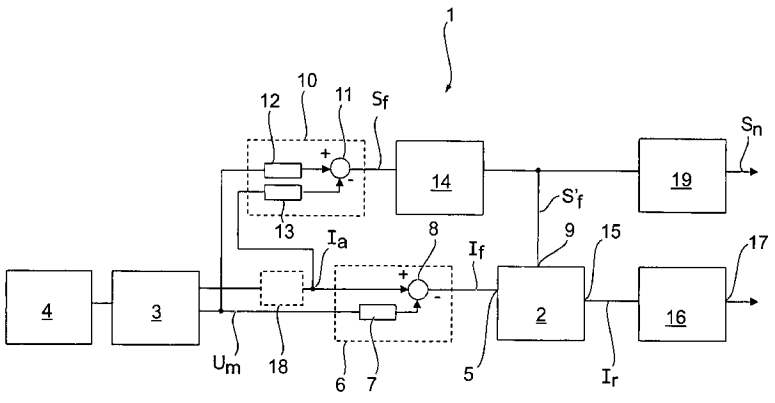

FIG. 1

(57) Abstract: According to the invention, for processing a motor signal (I_a, U_m) of a DC motor (4), in particular an adjusting drive of a motor vehicle, the armature current (I_a) and the motor tension (U_m) of the DC motor (4) are detected and are used to determine the counter induction tension (E) of the DC motor (4). Using the determined counter induction tension (E), a useful signal (S_F,$S_{ÜKB}$), in particular proportional to the rotational speed, is produced from the armature current signal (I_a) for detecting the position and/or for evaluating an excess force limitation.

(57) Zusammenfassung: Zur Verarbeitung eines Motorsignals (I_a, U_m) eines Gleichstrommotors (4), insbesondere eines Verstellantriebs eines Kraftfahrzeugs, werden der Ankerstrom (I_a) und die Motorspannung

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2010/028736 A2

Veröffentlicht:

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

(U_m) des Gleichstrommotors (4) erfasst und zur Ermittlung der Gegeninduktionsspannung (E) des Gleichstrommotors (4) herangezogen, wobei anhand der ermittelten Gegeninduktionsspannung (E) aus dem Ankerstromsignal (I_a) ein - insbesondere drehzahlproportionales - Nutzsignal (S_f,$S_{ÜKB}$) zur Positionserfassung und/oder zur Bewertung einer Überschusskraftbegrenzung erzeugt wird.

Beschreibung

Verfahren und Vorrichtung zur Verarbeitung eines Stromrippel aufweisenden Motorsignals eines Gleichstrommotors

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Verarbeitung eines Motorsignals eines Gleichstrommotors, mit einem steuerbaren Frequenzfilter, der anhand der im Ankerstrom des Gleichstrommotors enthaltenen Welligkeiten (Stromrippel) ein drehzahlproportionales Ausgangssignal erzeugt.

Ein auch als Kommutatormotor bezeichneter Gleichstrommotor ist ein permanent erregter Elektromotor, dessen Motor- oder Ankerstrom infolge der Kommutierung einen auch als Stromwelligkeit oder Stromrippel bezeichneten Wechselstromanteil enthält, der einem Gleichstromanteil überlagert ist. Ein solcher Gleichstrommotor wird insbesondere auch bei einem Verstellantrieb, beispielsweise bei einem Fensterheber-, Schiebedach- oder Heckklappenantrieb, eines Kraftfahrzeugs eingesetzt. In dieser Anwendung ist es von erheblicher Bedeutung, mit einfachen Mitteln eine zuverlässige Ermittlung der Motor- oder Ankerstellung und damit eine präzise Positionsbestimmung des motorisch angetriebenen Verstellteils (Stellelement) zu ermöglichen.

Die Häufigkeit der Stromrippel ist abhängig von der Anzahl der Kommutator- oder Kollektorlamellen des Motorankers. Somit kann aus der Anzahl der Stromrippel in einem Zeitintervall sowohl auf die Drehstellung des Motors - und damit auf die Position eines hiervon angetriebenen Verstellteils - als auch anhand der Frequenz (Rippelfrequenz) des Stromrippelsignals auf die Motordrehzahl geschlossen werden. Dem Motorsignals und damit dem die Stromrippel enthaltenden Nutzsignal sind jedoch insbesondere hochfrequente Störsignale überlagert. Auch vergleichsweise niederfrequente Störungen, die sich auf den Verlauf des dem Stromrippel unterlagerten Gleichsignalanteils auswirken und im Wesentlichen auf den betriebsbedingt schwankenden Kraft- oder Drehmomentverlauf des Motors zurückzuführen sind, sind bei einer Auswertung der Stromrippel zu berücksichtigen.

Bei einer aus der DD 254 254 A1 bekannten Schaltungsanordnung zur Erzeugung einer drehzahlproportionalen Impulsfolge bei Gleichstrom-Kommutatormotoren wird ein an einem Strom-Spannungs-Wandler in Form eines ohmschen Widerstandes abgegriffenes Motorsignal einem spannungsgesteuerten Hochpassfilter und einem nachgeschalteten spannungsgesteuerten Tiefpassfilter zur Realisierung eines schmalbandigen Bandpasses zugeführt, an dessen Ausgang eine drehzahlproportionale Impulsfolge erzeugt wird.

Aus der US 4,924,166 ist es darüber hinaus bekannt, zur Bearbeitung der im Ankerstrom eines Gleichstrommotors erzeugten Stromrippel als steuerbaren Filter eine Phasenregelschleife (phase locked loop) mit einem Phasenvergleicher und einem diesem über einen Tiefpass nachgeschalteten steuerbaren Oszillator (VCO) einzusetzen. Dem Phasenvergleicher wird eingangsseitig das tiefpassgefilterte Motorsignal zugeführt, während dessen Oszillator mit einem aus der elektromotorischen Kraft (EMK) abgeleiteten Signal angesteuert wird. Dem Signaleingang der Phasenregelschleife wird hierzu über einen Tiefpassfilter das an einem Shunt abgegriffene Ankerstromsignal direkt zugeführt, während das Steuersignal für den Oszillator der Phasenregelschleife aus der Differenz zwischen der Motorspannung und dem Produkt aus dem Ankerwiderstand und dem Ankerstrom als so genanntes back-e.m.f.-Signal (back electromotive force oder Gegeninduktionsspannung) zugeführt wird.

Die Ansteuerung eines einstellbaren Bandpassfilters anhand der induzierten Gegenspannung (EMK-Spannung), die aus der erfassten Motorspannung und dem erfassten Ankerstrom ermittelten wird, ist auch aus der DE 195 11 307 C1 bekannt. Ansonsten wird bei diesem bekannten Verfahren die Frequenzfilterung durch eine Abschätzung der aktuellen Nutzfrequenz (Rippelfrequenz) des Ankerstromsignals derart eingestellt, dass das Durchlassfrequenzband die Nutzfrequenz umfasst sowie oberhalb und/oder unterhalb der Störfrequenzen liegt. Aus dem derart gefilterten Signal werden die relativen Extremwerte (Minimum- und Maximum-Auswertung) ermittelt.

Auch bei einem aus der DE 198 34 108 A1 bekannten Verfahren zur Bestimmung der Anzahl von Motorumdrehungen bei Elektromotoren aus Stromrippeln wird zur Beseitigung hochfrequenter Störungen das Motorstromsignal zunächst einem Tiefpass zugeführt. Die Stromrippel werden wiederum anhand von berechneten Differenzwerten zwischen aufeinander folgenden Minimal- und Maximalwerten des tiefpassgefilterten Motorstromsignals ermittelt.

Bei einer aus der EP 0 579 015 B1 bekannten Schaltungsanordnung zur Erfassung einer drehzahlproportionalen Impulsfolge für einen Gleichstromkommutatormotor ist ein frequenzselektives Filter mit einer entsprechend der Motordrehzahl veränderlichen Grenzfrequenz vorgesehen. Dabei liegt die untere Frequenz bei praktisch unveränderter Motordrehzahl deutlich unter, bei Änderung der Drehzahl jedoch etwa im Bereich der Impulsfolge. Damit soll es möglich sein, vorrübergehend ein differenzierendes Verhalten des Bandpasses während Drehzahländerungen zu erreichen und damit auch während dieser Änderungen die Drehlage des Gleichstromkommutatormotors exakt zu bestimmen.

Um einen Frequenzfilter variabel zu gestalten, ist es aus der EP 1 037 052 B1 (DE 600 05 727 T2) bekannt, ein aktives Hochpassfilter (CR-Filter) mit geschalteten Kapazitäten (switched-capaciter-Filter) einzusetzen, um Störungen aus dem Motorsignal zu beseitigen und die Drehzahl aus der Welligkeit eines Gleichstrommotors zu bestimmen. Hierzu werden Kapazitäten mittels eines Taktsignals geschaltet, so dass sich die Filter-Eckfrequenz ändert und ein nachgeordneter Schaltkreis eine Welligkeitsimpulsfolge erzeugt, die auch als Grundlage für die Erzeugung des Taktsignals dient.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein besonders geeignetes Verfahren zur Verarbeitung eines Motorsignals (Motor- bzw. Ankerstrom, Motorspannung) eines Gleichstrommotors anzugeben. Auch soll ein möglichst störungsfreies, insbesondere drehzahlproportionales Signal erzeugt werden. Dieses soll zur Positionsbestimmung für eine Verstelleinrichtung eines Kraftfahrzeugs und/oder zur Überschusskraftbegrenzung in einem Einklemmschutzsystem geeignet sein. Des

Weiteren solle eine geeignete Vorrichtung zur Verarbeitung eines solchen Motorsignals angegeben werden.

Bezüglich des Verfahrens wird diese Aufgabe erfindungsgemäß gelöst durch die Merkmale des Anspruchs 1. Hierzu werden der Ankerstrom bzw. ein Ankerstromsignal des Gleichstrommotors erfasst und zur Ermittlung der Gegeninduktionsspannung des Gleichstrommotors herangezogen. Zudem wird zur Ermittlung der Gegeninduktionsspannung des Gleichstrommotors zusätzlich die Motorspannung erfasst bzw. ein entsprechendes Motorspannungssignal erzeugt. Anhand der ermittelten Gegeninduktionsspannung wird aus dem Ankerstromsignal ein – insbesondere drehzahlproportionales - Nutzsignal erzeugt.

Gemäß einer Variante der Erfindung wird das Ankerstromsignal des Gleichstrommotors einem steuerbaren, d. h. hinsichtlich dessen Frequenzgang bzw. Grenz- oder Mittenfrequenz bestimmbaren Filterbaustein zugeführt. Das beispielsweise als veränderlicher Bandpass wirksame Frequenzfilter erzeugt anhand der im Ankerstrom bzw. in einem entsprechenden Ankerstromsignal enthaltenen Stromrippel ein drehzahlproportionales Ausgangssignal.

Dem Frequenzfilter wird steuerseitig ein aus der Gegeninduktionsspannung ermitteltes drehzahlproportionales Steuersignal und signaleingangsseitig ein Filtereingangssignal zugeführt. Das Filtereingangssignal ist aus dem die Stromrippel enthaltenden Ankerstromsignal und dem mit einer Tiefpasscharakteristik, vorzugsweise mit einer Tiefpassfunktionalität erster Ordnung, gewichteten Motorspannungssignal abgeleitet.

Die Gegeninduktionsspannung wird aus der erfassten Motorspannung und dem aus dem Ankerstromsignal und dem Ankerwiderstand ermittelten Produkt bestimmt. Das Filtereingangssignal ist aus der Differenz zwischen dem Ankerstromsignal (Minuend) und einem aus einem mathematischen Motormodell abgeleiteten Subtrahend gebildet. Dieser steigt zeitlich nach dem Einschalten bzw. Anliegen der Motorspannung mit dieser auf einen Stromwert an, der proportional zum Produkt aus dem Kehrwert des Anker- oder Ankerwicklungswiderstandes und der Mo-

torspannung mit einer Verzögerung (erster Ordnung) ist, wobei die Zeitkonstante durch die Induktion und den Kehrwert des Wicklungswiderstandes gegeben ist. Dieses Verhalten entspricht der Funktion eines Tiefpassfilters erster Ordnung.

Das Nutzsignal wird geeigneterweise einem Tiefpassfilter zugeführt. Dieser kann als digitales Filter mit fester Grenzfrequenz ausgeführt sein. Der entsprechende Tiefpass dient gemäß einer auf die Überkraftbegrenzung gerichteten Variante der Erfindung zusätzlich zur Dämpfung von hochfrequenten Störungen auch zur Entfernung der hochfrequenten Rippel.

Für eine (Drehzahl-)Überschusskraftbegrenzung (Drehzahl-ÜKB) wird die Drehzahl- oder Geschwindigkeitsänderung herangezogen, insbesondere als Eingangsgrößer eines Funktionsbausteins zur Drehzahldifferenzermittlung. Zur Berechnung dient geeigneterweise die erste Ableitung der Gegeninduktionsspannung. Auch kann durch eine geeignete Auswertung von Rippelereignissen (Rippel-Events) die Bildung oder Berechnung der Ableitung derart ausgeführt bzw. genutzt werden, dass im Signal eventuell noch vorhandene Rippel entfernt werden.

Hierzu wird geeigneterweise die Differenzierung nicht anhand zweier benachbarter Wertepaare, sondern vorzugsweise stets im Abstand einer Anzahl n von Rippeln durchgeführt, wobei n der Anzahl der Kommutatornuten entspricht. Für einen Abtastwert gilt dann:

$$u1 = E_{ripple_n}\sin(2\pi ft) + E_1$$
$$u2 = E_{ripple_n}\sin(2\pi ft + \varphi) + E_2$$
$$für \varphi = 2\pi n$$
$$\Delta E = u2 - u1$$
$$\Delta E = E_2 - E_1$$

Hierdurch werden die durch den Wechselanteil der Rippel bedingten Schwankungen der Gegeninduktionsspannung E entfernt.

In zweckmäßiger Weiterbildung der Variante zur Verarbeitung des Motor- bzw. Ankerstromsignals für eine Positionsbestimmung mit einem steuerbaren Fre-

quenzfilter wird diesem das Nutzsignal nicht direkt, sondern ebenfalls nach vorheriger Tiefpassfilterung als tiefpassgefiltertes Steuersignal zugeführt. Die Tiefpassfilterung des Steuersignals dient zu dessen Glättung für die Frequenzabstimmung und damit zur Stabilisierung des beispielsweise als Bandpassfilter ausgeführten Frequenzfilters.

Geeigneterweise wird das Ankerstromsignal in einem Tiefpassfllter vorgefiltert. Hierdurch werden die für den so genannten Alias-Effekt verantwortlichen hohen Frequenzanteile gedämpft. Ein entsprechendes analoges Tiefpassfilter ist demnach der weiteren Verarbeitung des Ankerstromsignals zur Erzeugung sowohl des Filtereingangssignals als auch des Steuersignals des Frequenzfilters vorgeordnet.

Bezüglich der Vorrichtung wird die genannte Aufgabe erfindungsgemäß gelöst durch die Merkmale des Anspruchs 12. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Varianten sind Gegenstand der hierauf rückbezogenen Unteransprüche.

So umfasst die Vorrichtung insbesondere eine Einrichtung zur Erfassung des Verlaufs des Ankerstroms als Ankerstromsignal und der Motorspannung (Motorspannungssignal). Des Weiteren umfasst die Vorrichtung einen Frequenzfilter mit einem Signaleingang und einem Signalausgang sowie mit einem Steuereingang. Dem Steuereingang ist ein erster Funktionsbaustein vorgeordnet, der ein drehzahlproportionales Steuersignal ermittelt. Dem Signaleingang des Frequenzfilters ist ein zweiter Funktionsbaustein mit Tiefpassfunktion vorgeordnet. Diese signaleingangsseitige Tiefpassfunktion wird aus der erfassten Motorspannung sowie aus der Selbstinduktion und der Gegeninduktion des Gleichstrommotors anhand eines Motormodells berechnet.

Zur Ermittlung des Filtereingangssignals wird die Differenz aus dem erfassten Ankerstrom und einem die Tiefpassfunktion enthaltenden Signal gebildet. Das Filtereingangssignal ist hierbei proportional zur Gegeninduktionsspannung mit der Folge, dass aus dem Filtereingangssignal insbesondere aufgrund von Einschaltstromspitzen erzeugte Störfrequenzen herausgefiltert oder zumindest gedämpft sind. Derartige hochfrequente Störanteile infolge von Schaltvorgängen, insbeson-

dere mit Einschaltstromspitzen beim Schalten des Gleichstrommotors, führen bislang zu erheblichen Problemen bei der Filterung der Stromrippel während der Startphase des Gleichstrommotors oder bei ähnlichen hochfrequenten Spannungsstörungen.

Die Funktionalität des dem steuerbaren Frequenzfilter signalseitig vorgeordneten zweiten Funktionsbausteins ist geeigneterweise die Funktionalität eines Tiefpassfilters erster Ordnung, die aus dem mathematischen Motormodell anhand der elektrischen Gleichung des Gleichstrommotors gemäß der Beziehung $U_m = R_a \times I_a + L_a \times dI_a/dt + E$ abgeleitet ist. Dabei sind U_m die Motorspannung, $R_a \times I_a$ das Produkt aus Ankerwiderstand und Ankerstrom des Gleichstrommotors, $L_a \times dI_{a/dt}$ die Selbstinduktion (Selbstinduktionsspannung) mit der Wicklungsinduktivität L_a und ΔE die Gegeninduktion (Gegeninduktionsspannung) des Gleichstrommotors. Aus dieser Beziehung berechnet sich der Korrektur- oder Subtraktionswert des vom Ankerstromsignal subtrahierten Stromverlaufs, der dem Produkt aus einem die Tiefpassfunktionalität charakterisierenden Faktor und der Motorspannung entspricht.

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand einer Zeichnung näher erläutert. Darin zeigen:

Fig. 1 in einem Blockschaltbild schematisch die Funktionsblöcke einer Vorrichtung zur Verarbeitung eines Ankerstromsignals mittels eines steuerbaren Frequenzfilters,

Fig. 2 in einem Strom-Zeit-Diagramm den Differenzverlauf zwischen dem Ankerstromsignal und einem Korrekturverlauf mit Tiefpasscharakteristik,

Fig. 3 in einem Diagramm gemäß Fig. 2 den Verlauf des Filtereingangssignals und des Filterausgangssignals,

Fig. 4 in einem Diagramm gemäß den Fig. 2 und 3 den Verlauf des ungefilterten und eines tiefpassgefilterten Filtersteuersignals, und

Fig. 5 in einem Blockschaltbild eine Messeinrichtung zur Erfassung und Vorverarbeitung eines Motor- bzw. Ankerstromsignals.

Einander entsprechende Teile sind in allen Figuren mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

Das in Fig. 1 veranschaulichte Blockschaltbild repräsentiert die Funktionalität eines Verfahrens und einer Vorrichtung zur Ermittlung der in einem Ankerstromsignal I_a eines Gleichstrommotors infolge dessen Kommutierung erzeugten Stromrippel. Diese Stromrippel oder Stromwelligkeiten sind als Wechselsignalanteil dem Gleichstromsignal des Gleichstrommotors überlagert. Da die Anzahl der Kommutatorlamellen des Gleichstrommotors bekannt ist, lässt sich aus der Anzahl der Stromrippel pro Zeiteinheit die Motordrehzahl und die Stellung des Motorankers (Ankerposition) bestimmen. Die Ankerposition oder -stellung wiederum korrespondiert mit der Position eines vom Gleichstrommotor angetriebenen Verstellelementes eines Kraftfahrzeuges. Somit lässt sich mit relativ einfachen Mitteln beispielsweise die Scheibenposition einer mittels eines Fensterheberantriebs automatisch verstellbaren Fensterscheibe eines Kraftfahrzeugs entlang deren Verstellweg zwischen einer oberen Schließstellung und einer unteren Offenstellung genau bestimmen. Die dabei aus der Gegeninduktionsspannung verwendeten Informationen können auch zur Überschusskraftbegrenzung (ÜKB), insbesondere zur Realisierung eines einfachen und zuverlässigen Einklemmschutz, herangezogen werden.

Die Vorrichtung 1 umfasst einen einstellbaren Frequenzfilter 2, vorzugsweise einen abstimmbaren Bandpass, sowie eine Messeinrichtung 3 mit Mitteln zur Erfassung sowohl des Ankerstroms bzw. eines entsprechenden Ankerstromsignals I_a als auch eines - nachfolgend als Motorspannung U_m bezeichneten - Motorspannungssignals eines Gleichstrommotors 4.

Die Frequenz f_{BW} des einstellbaren Bandpasses ist bestimmt durch die Beziehung:

$$f_{BW} = n = k \cdot E \qquad (1), \text{ mit}$$

$$E = U_m - R_a \cdot I_a \qquad (2)$$

Dabei sind E die Gegeninduktionsspannung (Gegen-EMK; engl. back-emf), U_m die Motorspannung, R_a der Wicklungswiderstand der Ankerwicklung des Gleichstrommotors, I_a der nachfolgend als Ankerstromsignal bezeichnete Ankerstrom, k eine Motorkonstante, und n die Motordrehzahl.

Die nachfolgende Gleichung (3) beschreibt das mathematische Modell des Gleichstrommotors.

$$U_m = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + E \qquad (3)$$

In Gleichung (3) geben die Terme $L_a \cdot dI_a/dt$ die Selbstinduktionsspannung und E die Gegeninduktionsspannung (Gegen-EMK) an, wobei L_a die Wicklungsinduktivität der Ankerwicklung ist.

Hieraus kann gemäß den nachfolgenden Gleichungen (4) bis (5) der Ankerstromverlauf I_a ermittelt werden, wobei s der Laplace-Operator (Laplace-Transformation).

$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{L_a}\left(U_m - E - R_a \cdot I_a\right) \qquad (4)$$

$$L_a \frac{dI_a}{dt} = \left(U_m - E\right) - R_a \cdot I_a \qquad (4.1)$$

$$L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a \cdot I_a = \left(U_m - E\right) \qquad (4.2)$$

$$\frac{d}{dt} \Leftrightarrow s \qquad (4.3)$$

$$\frac{dI_a}{dt} \Leftrightarrow sI_a \qquad (4.4)$$

$$L_a s I_a + R_a \cdot I_a = \left(U_m - E\right) \qquad (4.5)$$

$$\left(L_a s + R_a\right) \cdot I_a = \left(U_m - E\right) \qquad (4.6)$$

$$I_a = \frac{1}{(L_a s + R_a)}(U_m - E) \qquad (4.7)$$

$$I_a = \frac{1}{(R_a + L_a s)}(U_m - E) \qquad (4.8)$$

$$I_a = \frac{1/R_a}{(1 + L_a/R_a * s)}(U_m - E) \qquad (4.9)$$

$$I_a = \frac{1/R_a}{1 + s\,L_a/R_a}(U_m - E) \qquad (5)$$

$$I_e = \frac{1/R_a}{(1 + sL_a/R_a)}(U_m) \qquad (6)$$

$$I_f = I_a - I_e \qquad (7)$$

In der Gleichung (5) ist zwar der Term E (Gegen-EMK) unbekannt. Jedoch kann erkanntermaßen diejenige Stromkomponente, die direkt von der angelegten Motorspannung U_m erhalten wird, ermittelt werden gemäß der Beziehung nach Gleichung (6).

Anhand der Gleichung (6) ist erkennbar, dass die angelegte (anliegende) Motorspannung U_m im Gleichgewichtszustand zu einem nachfolgend auch als Korrektursignal bezeichneten Signalverlauf (Schalt- oder Einschaltstromsignal) I_e gemäß der Beziehung $I_e = U_m/R_a$ mit der Verzögerung (erster Ordnung) und der Zeitkonstanten $T_a = L_a/R_a$ führt. Dies entspricht der Filtercharakteristik eines Tiefpassfilters erster Ordnung.

Gemäß der Beziehung nach Gleichung (7) lässt sich durch Differenzbildung ein Filtereingangssignal I_f ermitteln, dass einem Signaleingang 5 des Frequenzfilters 2 zugeführt wird. Hierzu ist ein (zweiter) Funktionsbaustein (Funktionsblock) 6 mit einem Multiplizierer 7 und mit einer Subtraktionsstufe 8 dem Frequenzfilter 2 signaleingangsseitig vorgeordnet. Im Funktionsbaustein 6 werden der Subtraktionsstufe 8 das erfasste Ankerstromsignal I_a direkt und die Motorspannung U_m über

den Multiplizierer 7 zugeführt, in dem eine Wichtung der gemessenen Motorspannung U_m mit dem aus Gleichung (6) resultierenden Faktor

$$A = \frac{1/R_a}{(1 + sL_a/R_a)}$$

erfolgt. Dieser Term entspricht einem Tiefpass bzw. einer Tiefpassfunktionalität erster Ordnung und bildet daher einen tiefpasscharakteristischen Faktor A. Das gewichtete Signal $A \cdot U_m$ wird in der Subtraktionsstufe 8 gemäß Gleichung (7) vom erfassten Ankerstromsignal I_a subtrahiert. Das Differenzsignale I_f, dessen typischer Verlauf in den Figuren 2 und 3 veranschaulicht ist, wird dem Frequenzfilter 2 als Filtereingangssignal I_f zugeführt.

Das einem Steuereingang 9 des Filterbausteins 2 zu dessen Frequenzbestimmung bzw. Grenz- oder Mittenfrequenzeinstellung zugeführte Nutz- oder Steuersignal S_f (back-emf-signal) wird gemäß der Beziehung nach den Gleichungen (1) bis (2), insbesondere nach der nach der Gegeninduktionsspannung E umgestellten Gleichung (3) gemäß der Beziehung $E = U_m - R_a \times I_a + L_a \times dI_a/dt$ durch Differenzbildung in einem weiteren (ersten) Funktionsbaustein 10 ermittelt, dem ebenfalls sowohl das Ankerstromsignal I_a als auch die Motorspannung U_m zugeführt sind.

Der Funktionsbaustein 10 umfasst wiederum eine Subtraktionsstufe 11. Zur Multiplikation sowohl der Motorspannung U_m mit dem Faktor p/K als auch des Ankerstromsignal I_a mit den Faktoren p/K bzw. $p/k \cdot R_a$ gemäß den Beziehungen $S_f = f_{BW} = n \cdot p = k \cdot E$ und analog zu den Gleichungen (1) und (2) folgend $S_f = p/k \cdot U_m - p/k \cdot R_a \cdot I_a$ sind jeweils ein Multiplizierer 12, 13 vorgesehen. Dabei ist p die Pol- oder Kommutatorlamellen- bzw. -nutenzahl des Motors 4.

Das an diesem (ersten) Funktionsbaustein 10 ausgangsseitig abgreifbare Ausgangssignal S_f ist in Fig. 4 veranschaulicht. Dieses Signal S_f wird einem Tiefpassfilter 14 zugeführt, der ausgangsseitig das in Fig. 4 ebenfalls veranschaulichte

Steuersignal S'_f liefert. Dieses tiefpassgefilterte Steuersignal S'_f wird dem Steuereingang 9 des Filterbausteins 2 zugeführt.

Das infolge der Frequenzfilterung generierte und an einem Signalausgang 15 des Frequenzfilters oder Bandpasses 2 abgreifbare drehzahlproportionale Ausgangssignal (Rippelsignal) I_r ist in Fig. 2 veranschaulicht. Fig. 2 zeigt zudem das (auch in Fig. 1 veranschaulichte) aus der Gegeninduktionsspannung abgeleitete und dabei tiefpassgefilterte Filtereingangssignal I_f.

Die Stromkomponente gemäß Gleichung (7) ist für die Motordrehung verantwortlich. Aus den Gleichungen (5) bis (7) ist erkennbar, dass die Gegeninduktionsspannung unbekannt und somit aus Gleichung (7) nicht ableitbar ist. Daher ist die Stromkomponente I_s proportional zur Gegeninduktionsspannung. Diese Stromkomponente enthält somit auch keine hochfrequenten Einschaltstromspitzen, die eine zuverlässige Filterung der Stromrippel aus dem Ankerstromsignal I_a äußerst schwierig oder sogar unmöglich machen würde.

Zudem ist erkennbar, dass die Komponenten I_f praktisch bis zu demjenigen Zeitpunkt null ist, zu dem der Gleichstrommotor 4 die Haftreibung (static friction) überwunden hat. Dies ist ebenfalls aus Fig. 1 erkennbar. Diese Tatsache sowie der Aspekt, dass die Motorspannung U_m im Filtereingangssignal I_f und somit in der Filteroperation des Filterbausteins 2 enthalten ist, erhöht die Genauigkeit der Rippelzählung beim sogenannten ripple-counting. Hierzu ist dem Filterbaustein 2 ein Funktionsbaustein (Digitalisierungsbaustein) 16 zur Digitalisierung des Ausgangssignals I_r nachgeschaltet. An diesem Digitalisierungsbaustein 16 ist ausgangsseitig die Information bezüglich der (relativen) Position eines Verstellelementes eines Kraftfahrzeugs an einem Zählerausgang 17 abgreifbar.

Die Einbindung oder Berücksichtigung der Motorspannung U_m in das Filtereingangssignal I_f einerseits sowie in das Steuersignal S_f des Filterbausteins 2 andererseits berücksichtigt die wichtigen Informationen zum Schalt- bzw. Einschaltzustand oder anderen, sich in der Motorspannung U_m widerspiegelnden Motorstöreinflüssen.

Die zusätzliche Tiefpassfilterung des in dem (ersten) Funktionsbaustein 10 ermittelten Nutz- oder Steuersignals S_f vermeidet eine fehlerhafte Abstimmung der Filterfrequenz des Bandpassfilters 2, so dass praktisch jeder vorhandene Stromrippel auch erfasst wird. Durch diese Tiefpassfilterung wird die Steuerfrequenz des Steuersignals S_f geglättet und die Filterfunktion des Bandpassfilters 2 stabilisiert.

Anstelle einer klassischen Bandpassfunktionalität des Filterbausteins 2 kann dieser auch mit einem Hochpassfilter und mit einem Tiefpassfilter derart aufgebaut sein, dass die Grenzfrequenz der Hochpassfunktionalität praktisch unverändert oder statisch ist, während lediglich die (obere) Grenzfrequenz der Tiefpasscharakteristik anhand des Steuersignals S'_f veränderlich ist. Der Filterbaustein 2 weist somit zweckmäßigerweise einen kombinierten einstellbaren Tiefpass und festen Hochpass auf.

Das Ankerstromsignal I_a wird in einem Tiefpassfilter (Antialiasing-Filter) vorgefiltert, so dass die für den Alias-Effekt verantwortlichen hohen Frequenzanteile gedämpft werden. Ein entsprechendes analoges Antialiasing-Filter 18 ist zur weiteren Verarbeitung des Ankerstromsignals I_a der Messeinrichtung 3 nachgeordnet - oder gemäß Fig. 5 in diese integriert - sowie dem (zweiten) Funktionsbaustein 6 vorgeordnet.

Zur Aufbereitung des Signals (Nutzsignal) S_f für eine Überschusskraftbegrenzung, insbesondere zur Verwendung in einem Einklemmschutzsystem, wird dieses Nutzsignal S_f einem Funktionsbaustein 19 zugeführt. Ein digitales Tiefpassfilter zur Unterdrückung der in diesem Signal S_f enthaltenen Rippel des Gleichstrommotors 4 zusätzlich zu hochfrequenten Störungen im Ankerstromsignal I_a und in der Motorspannung U_m ist dann durch einen separaten Filterbaustein realisiert oder in den Tiefpassfilter 14 integriert. Durch eine nachfolgende Differenzierung der Gegeninduktionsspannung mittels des entsprechenden Funktionsbausteins 19 werden durch den Wechselanteil des Rippels im Signal S_f enthaltene Schwankungen der Gegeninduktionsspannung E entfernt, so dass am Funktionsbaustein 19 ausgangsseitig ein gewünschtes drehzahlproportionales Nutz- oder ÜKB-Signal S_n für eine ÜKB-Bewertung abgreifbar ist.

Durch die Berechnung der Gegeninduktionsspannung E kann somit ein drehzahlproportionales Signal aus dem Ankerstromsignal I_a abgeleitet werden, dass einerseits zur vergleichsweise exakten Filterung der zu Positionserfassung zu detektierenden Stromrippel I_r durch eine entsprechend optimale Nachführung der Filterfrequenz des Filterbausteins 2 herangezogen werden kann. Andererseits kann dieses Signal S_f als Nutzsignal für ein beispielsweise bereits vorhandenes drehzahlbasiertes ÜKB-System herangezogen werden. Hierdurch ist der Rechenaufwand eines Systems mit rippelbasierter Positionserfassung und parallel hierzu eingesetztem drehzahlbasiertem ÜKB-System erheblich reduziert. Dadurch können vorhandene drehzahlbasierte ÜKB-Systeme in solche mit einer Stromauswertung in einfacher Weise übernommen werden.

Fig. 5 zeigt ein Blockschaltbild einer Messeinrichtung 3 zur Aufbereitung des Ankerstromsignals I_a des Gleichstrommotors 4. Prinzipiell wird hierbei der Ankerstrom I_a mittels eines Doppelrelais 20 und zwei Strommesswiderständen (Shunts) 21 und 22 erfasst. Diesen sind über jeweils einen Entkopplungswiderstand 23a bzw. 23b zwei aktive Filter (Filterbausteine) 24a und 24b nachgeordnet. Die aktiven Filter 24a und 24b umfassen jeweils einen Operationsverstärker 25a, 25b mit nachgeschaltetem Tiefpass 26a bzw. 26b. Das Schaltungsprinzip ist das eines Filters mit mehrfacher Gegenkopplung.

Die beiden Filter bzw. Filterbausteine 24a, 24b bildenden zwei parallel geschaltete Mess- oder Eingangskanäle und sind über die Dimensionierung deren Bauteile auf eine bestimmte Frequenz und eine gewünschte Verstärkung adaptierbar. Die somit parallel geschalteten Filter bzw. Eingangskanäle 24a, 24b sind über ein ODER-Glied 27 logisch miteinander verknüpft. Hierdurch ergibt sich eine Anordnung mit zwei Eingangskanälen und einem einzigen Ausgangskanal 28 für das Ankerstromsignal I_a.

In jedem der beiden Eingangskanäle kann ein weitestgehend beliebiger Offset Off_a, Off_b eingekoppelt werden. Durch die Verwendung von zwei zusätzlichen Digi-

tal-IOs eines Mikrokontrollers kann jeder der beiden Offsets Off_a, Off_b erneut auf „Null" gesetzt werden.

Insgesamt ist somit die Messeinrichtung 3 eine verknüpfte Verstärkerschaltung mit zwei aktiven Filtern 24a, 24b in der dargestellten Grundschaltung. In die Eingangskanäle 24a, 24b können Offsets Off_a bzw. Off_b eingekoppelt und wieder abgeschaltet werden.

Aufgrund der analogen Verknüpfung der Eingangskanäle (eingangsseitigen Messkanäle oder -pfade) 24a, 24b können die beiden Messpfade an einem AD-Wandler-Eingang des Mikrokontrollers ausgewertet werden. Durch die gesunkene Anzahl an Wandlerkanälen ist somit eine höhere Abtastrate des Mess- bzw. Ankerstromsignal I_a möglich. Aufgrund der Verwendung eines aktiven Filters ist ein Filterverhalten höherer Ordnung mit relativ geringem Bauteileaufwand sowie einer gleichzeitigen Verstärkung des Ankerstromsignal I_a ermöglicht.

Systembedingt ist zwar jeder der einzelnen Eingangskanäle 24a und 24b ausreichend, um den Ankerstrom in allen Zuständen darzustellen. Jedoch können auch im generatorischen Motorbetrieb negative Ströme auftreten. Um diese Zustände über die dargestellte Messschaltung der Messvorrichtung 3 erfassen zu können, werden an den Eingängen die Offsets Off_a, Off_b eingekoppelt. Obwohl die beiden Verstärkerbausteine 25a, 25b parallelgeschaltet sind, kann das Ankerstromsignal I_a in Form von zwei diskreten Kanälen abgegriffen und verarbeitet werden. Hierbei sollte allerdings physikalisch an einem anderen Punkt gemessen werden.

Da im dargestellten Messsystem der Messvorrichtung 3 jeweils nur eine der beiden Eingangspfade 24a, 24b ein gültiges Signal aufweisen kann, kann der nicht verwendete Eingang mit Hilfe eines Pins des Mikrokontrollers inaktiv geschaltet werden. Aufgrund der Verwendung eines beliebigen Offsets Off_a, Off_b im Messwert kann somit ein beliebig negativer Strom gemessen und wiederum wahlweise der über einen der beiden Eingangskanäle 24a, 24b geführten Stromwert bzw. Stromverlauf an nur einem Ausgangskanal 28 gemessen werden.

Zur Verarbeitung eines Motorsignals I_a, U_m eines Gleichstrommotors 4, insbesondere eines Verstellantriebs eines Kraftfahrzeugs, werden gemäß der Erfindung der Ankerstrom I_a und die Motorspannung U_m des Gleichstrommotors 4 erfasst und zur Ermittlung der Gegeninduktionsspannung E des Gleichstrommotors 4 herangezogen. Anhand der ermittelten Gegeninduktionsspannung E wird aus dem Ankerstromsignal I_a ein – insbesondere drehzahlproportionales - Nutzsignal S_f, S'_f, und/oder S_n zur Positionserfassung bzw. zur Bewertung einer Überschusskraftbegrenzung erzeugt.

Bezugszeichenliste

1	Vorrichtung
2	Bandpass-/Frequenzfilter
3	Messeinrichtung
4	Gleichstrommotor
5	Signaleingang
6	(zweiter) Funktionsbaustein
7	Multiplizierer
8	Subtraktionsstufe
9	Steuereingang
10	(erster) Funktionsbaustein
11	Subtraktionsstufe
12	Multiplizierer
13	Multiplizierer
14	Tiefpassfilter
15	Signalausgang
16	Funktions-/Digitalisierungsbaustein
17	Zählerausgang
18	Tiefpass-/Antialising-Filter
19	Funktionsbaustein
20	Doppelrelais
21	Strommesswiderstand/Shunt
22	Strommesswiderstand/Shunt
23a,b	Entkopplungswiderstand
24a,b	Filter/Eingangskanal
25a,b	Operationsverstärker
26a,b	Tiefpass
27	ODER-Glied
28	Ausgangskanal

I_a	Ankerstrom/-signal
I_f	Filtereingangssignal

I_r Filterausgangssignal

S_f Steuer-/Nutzsignal

S_f' Steuersignal

S_n Nutz-/ÜKB-Signal

U_m Motorspannung/-spannungssignal

Ansprüche

1. Verfahren zur Verarbeitung eines Motorsignals (I_a, U_m) eines Gleichstrommotors (4), insbesondere eines Verstellantriebs eines Kraftfahrzeugs, bei dem der Ankerstrom bzw. ein Ankerstromsignal (I_a) und die Motorspannung (U_m) des Gleichstrommotors (4) erfasst und zur Ermittlung der Gegeninduktionsspannung (E) des Gleichstrommotors (4) herangezogen werden, und bei dem anhand der ermittelten Gegeninduktionsspannung (E) aus dem Ankerstromsignal (I_a) ein – insbesondere drehzahlproportionales - Nutzsignal (S_f,$S_{ÜKB}$) erzeugt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass das Ankerstromsignal (I_a) einem steuerbaren Frequenzfilter (2) zugeführt wird, das ein drehzahlproportionales Ausgangssignal (I_r) erzeugt.

3. Verfahren nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet,
dass dem Frequenzfilter (2) ein aus der Gegeninduktionsspannung (E) ermitteltes Steuersignal (S'_f) zugeführt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3,
dadurch gekennzeichnet,
dass dem Frequenzfilter (2) ein aus dem Ankerstromsignal (I_a) und aus der Motorspannung (U_m) abgeleitetes Filtereingangssignal (I_f) zugeführt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Gegeninduktionsspannung (E) aus der erfassten Motorspannung (U_m) und dem Produkt aus dem erfassten Ankerstromsignal (I_a) und dem Ankerwiderstand (R_a) ermittelt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Motorspannung (U_m) mit einem tiefpasscharakteristischen Faktor (A) gewichtet und daraus ein Korrektursignal (I_e) abgeleitet wird, wobei das Filtereingangssignal (I_f) aus der Differenz des Ankerstromsignals (I_a) und dem Korrektursignal (I_e) Motorspannung () erzeugt wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
dadurch gekennzeichnet,
dass das Nutzsignal (S_f) einem Tiefpassfilter (14) zugeführt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7,
dadurch gekennzeichnet,
dass dem steuerbaren Frequenzfilter (2) ein tiefpassgefiltertes Steuersignal (S'_f) zugeführt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8,
dadurch gekennzeichnet,
dass das Ankerstromsignal (I_a) in einem Tiefpassfilter (17) vorgefiltert wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9,
dadurch gekennzeichnet,
dass das Ankerstromsignal (I_a) mittels zwei Stromerfassungsgliedern (21,22) erfasst und einem Filterbaustein mit zwei, vorzugsweise logisch verknüpften, Eingangskanälen (24a,24b) und einem einzelnen Ausgangskanal (28) zugeführt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet,
dass die beiden Eingangskanäle (24a,24b) aus zwei, insbesondere parallel geschalteten und/oder aktiven, Filtern gebildet werden.

12. Vorrichtung (1) zur Verarbeitung eines Ankerstromsignals (I_a) eines Gleichstrommotors (4), insbesondere eines Verstellantriebs eines Kraftfahrzeugs, mit einer Messeinrichtung (3) zur Erfassung eines Ankerstromsignal (I_a) und des Motorstroms bzw. eines Motorspannungssignal (U_m) des Gleichstrommotors (2), und mit einem (ersten) Funktionsbaustein (10) zur Ermittlung eines - insbesondere drehzahlproportionalen - Nutzsignals (S_f) aus der Gegeninduktionsspannung (E) des Gleichstrommotors (4).

13. Vorrichtung (1) nach Anspruch 12, mit einem steuerbaren Frequenzfilter (2) mit einem Steuereingang (9) und mit einem Signaleingang (5) sowie mit einem Signalausgang (15), wobei an Steuereingang (9) das drehzahlproportionale Nutzsignal (S_f) als Steuersignal (S'_f) und an den Signaleingang (5) ein aus dem Ankerstromsignal (I_a) und der Motorspannung (U_m) abgeleitetes Filtereingangssignal (I_f) geführt sind, und wobei am Signalausgang (15) ein anhand der im Filtereingangssignal (I_f) enthaltenen Stromrippe erzeugtes Ausgangssignal (I_r) abgreifbar ist.

14. Vorrichtung (1) nach Anspruch 13, mit einem ausgangsseitig an den Signaleingang (5) des Frequenzfilters (2) geführten (zweiten) Funktionsbaustein (6) zur Erzeugung des Filtereingangssignals (I_f).

15. Vorrichtung (1) nach Anspruch 14,
dadurch gekennzeichnet,
dass der (zweite) Funktionsbaustein (6) ein zur Gegeninduktionsspannung (E) proportionales Stromsignal (I_f) erzeugt.

16. Vorrichtung (1) nach Anspruch 14 oder 15,
dadurch gekennzeichnet,
dass der (zweite) Funktionsbaustein (6) die Funktionalität einer Subtraktionsstufe (8) zur Ermittlung der Differenz zwischen dem Ankerstromsignal (I_a) und einem Korrektursignal (I_e) mit Tiefpasscharakteristik aufweist.

17. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 14 bis 16,
dadurch gekennzeichnet,
dass der (zweite) Funktionsbaustein (6) die Funktionalität eines Multiplizierers gemäß der Beziehung $I_e = A \cdot U_m$ aufweist, wobei $A = R_a^{-1}/(1 + s\, L_a\, R_a^{-1})$ eine Tiefpassfunktion erster Ordnung entspricht und s die zeitliche Ableitung des Ankerstroms (dI_a/dt) sowie R_a der ohmsche Wicklungswiderstand und L_a die Wicklungsinduktivität des Gleichstrommotors (4) sind.

18. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 12 bis 17,
dadurch gekennzeichnet,
dass dem (ersten) Funktionsbaustein (10) ein Tiefpassfilter (14) nachgeordnet ist.

19. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 12 bis 18,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Messeinrichtung (3) zwei Stromerfassungsglieder (21,22) und einen aktiven Filter mit zwei Eingangskanälen (24a,24b) für das Ankerstromsignal (I_a) einen einzelnen Ausgangskanal (28) aufweist.

20. Vorrichtung (1) nach Anspruch 19,
dadurch gekennzeichnet,
dass die beiden Eingangskanäle (24a,24b), insbesondere über eine logische ODER-Glied (27), logisch verknüpft, vorzugsweise über die logische Verknüpfung in den Ausgangskanal (28) geführt, sind.

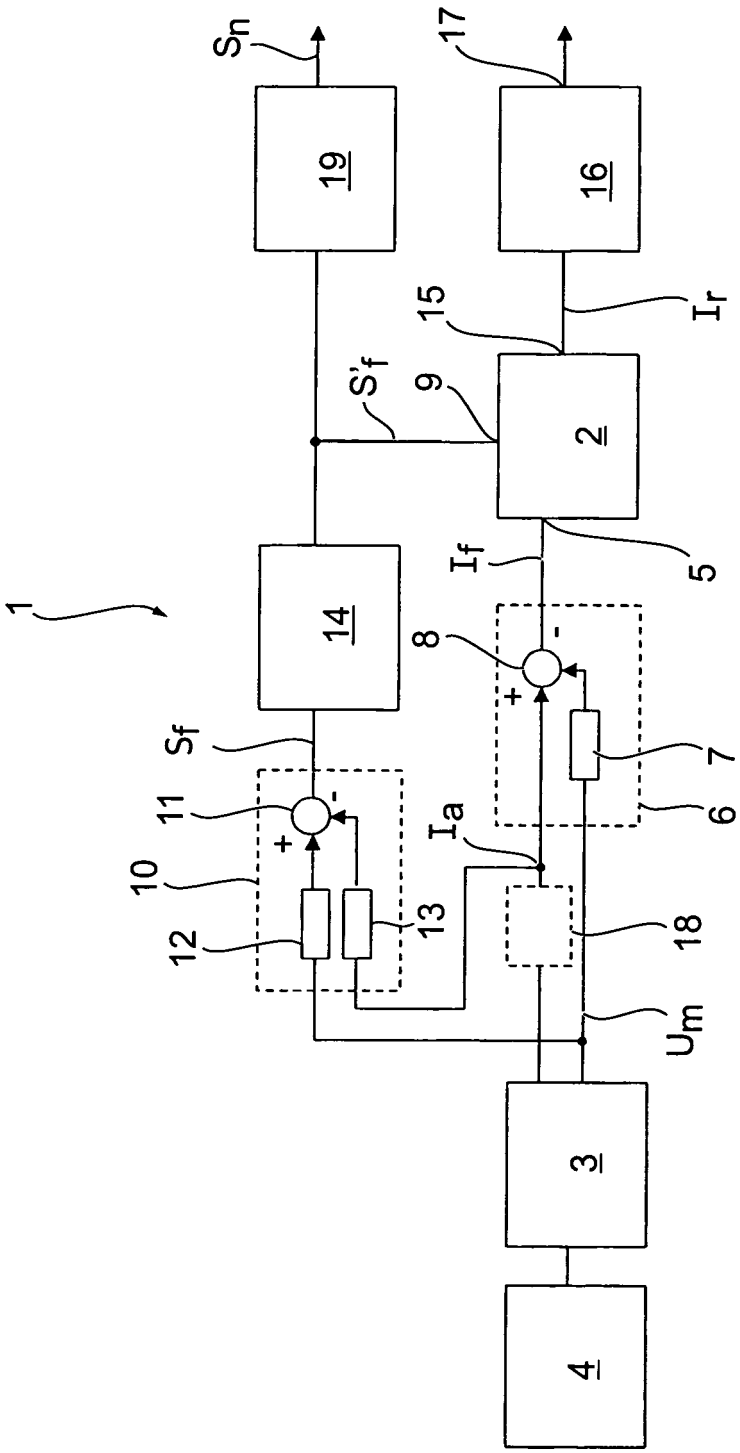

FIG. 1

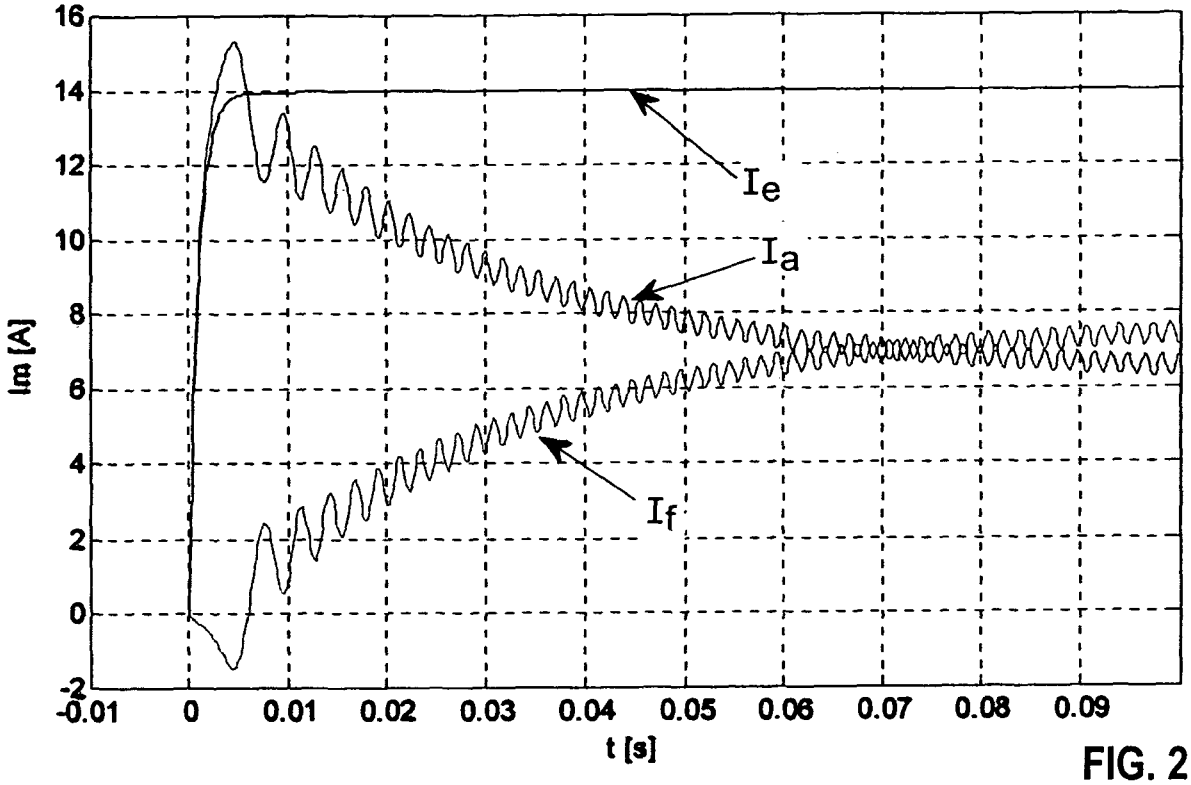
16
14
12
10
8
6
4
2
0
-2
-0.01
0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
Im [A]
t [s]
Ie
Ia
If

FIG. 2

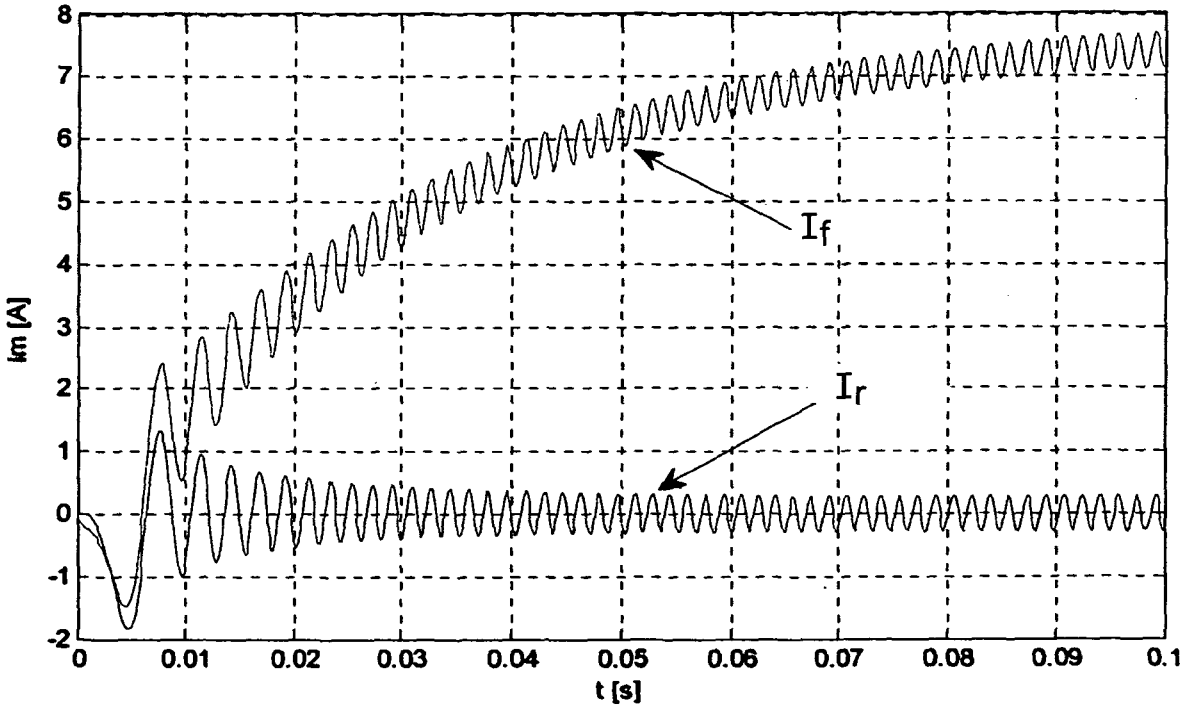
8
7
6
5
4
3
2
1
0
-1
-2
0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
0.1
Im [A]
t [s]
If
Ir

FIG. 3

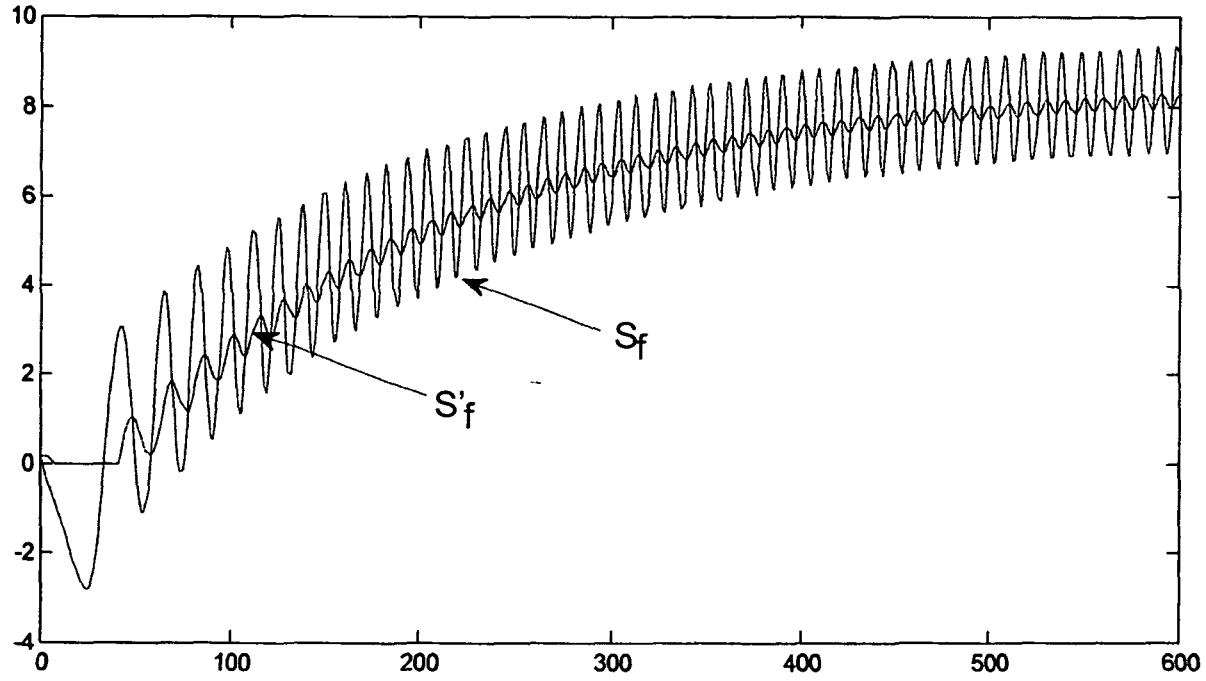

FIG. 4

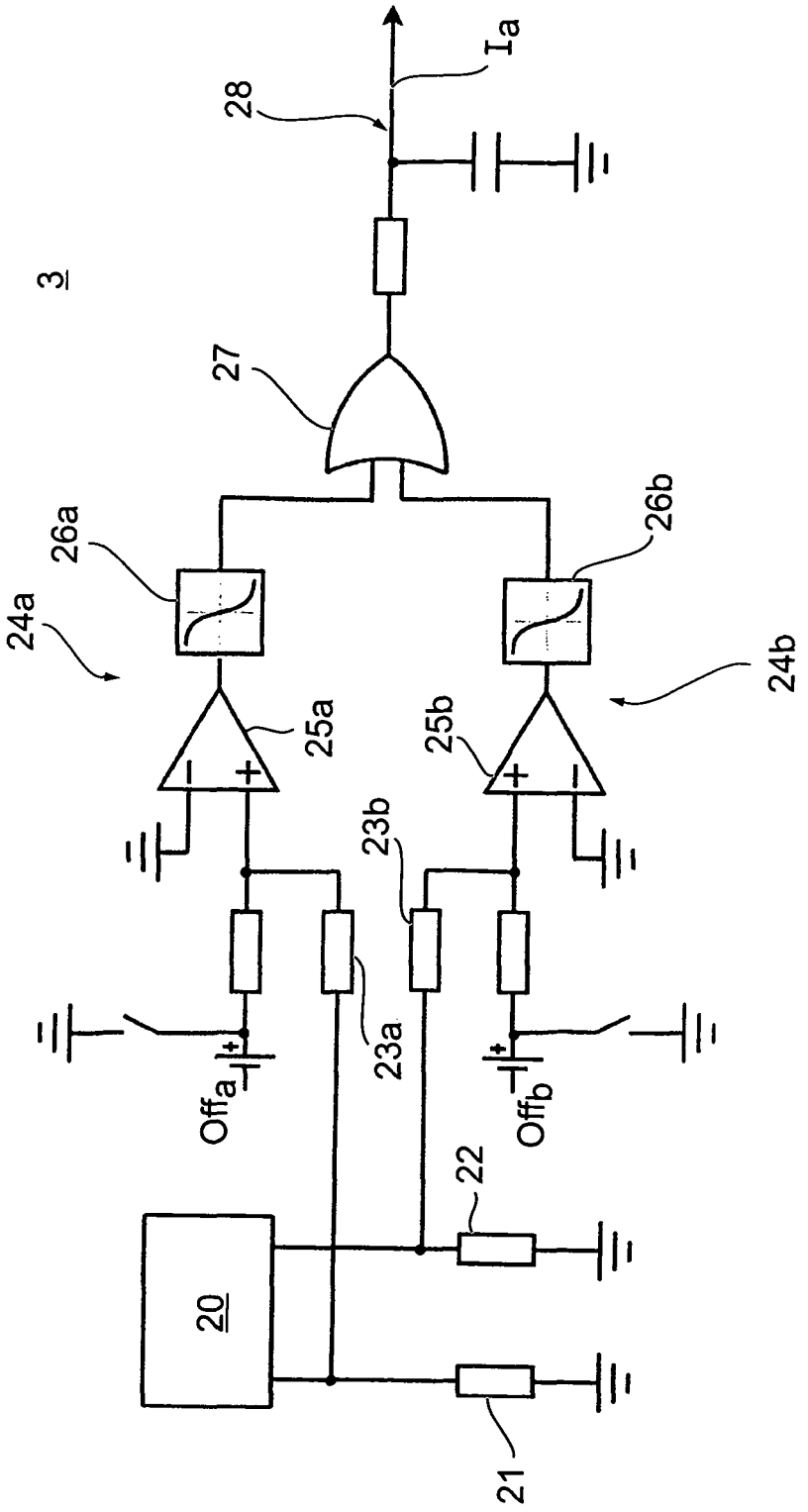

FIG. 5