

**BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**

REC'D 2 2 JAN 2002

WIPO

PCT

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 100 55 192.0

**Anmeldetag:** 7. November 2000

**Anmelder/Inhaber:** MTU Motoren- und Turbinen-Union Friedrichshafen GmbH, Friedrichshafen/DE

**Bezeichnung:** Rundlaufregelung für Dieselmotoren

**IPC:** F 02 D 41/38

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 8. Oktober 2001  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
**Der Präsident**  
 Im Auftrag

**PRIORITY  
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

MTU MOTOREN- UND TURBINEN-UNION  
FRIEDRICHSHAFEN GMBH

5

Friedrichshafen, den 7. November 2000

### Rundlaufregelung für Dieselmotoren

10 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Rundlaufregelung, wie es beispielsweise aus der DE 195 48 604 C1 als bekannt hervorgeht. Das bekannte Verfahren dient dazu, Unterschiede der Momentenbeiträge einzelner Zylinder einer Brennkraftmaschine anhand des Kurbelwellendrehzahlverlaufs zu bestimmen. Dabei wird auf der Erkenntnis aufgebaut, dass die Drehbewegung der Kurbelwelle unter der Wirkung von Gas- und Massenkräften ungleichförmig verläuft. Um den Drehzahl- bzw. Drehmomentenanteil eines Zylinders zu  
15 bestimmen, werden während des Motorbetriebs einzelne Zylinder gezielt abgeschaltet. Durch Vergleich mit dem Drehzahlverlauf des ohne Zylinderabschaltung betriebenen Motors lässt sich der Momentenanteil jedes einzelnen Zylinders am Gesamtmotordrehmoment anhand des Drehzahlsignals isoliert darstellen. Die von Fertigungstoleranzen herrührenden Einspritzmengenstreuungen werden erkannt und sollen  
20 ausgeglichen werden, indem in allen Zylindern gleiche Mitteldrücke durch Einspritzmengenvariierung hergestellt werden.

25 Ein ähnliches Verfahren ist in der DE 41 22 139 C2 beschrieben. Auch hier wird davon ausgegangen, dass Drehungleichförmigkeiten auftreten, die darauf beruhen, dass aufgrund von Toleranzen in den Einspritzvorrichtungen in die einzelnen Zylindern der Brennkraftmaschine unterschiedliche Kraftstoffmengen eingespritzt werden. Ansatz ist, dass das Drehmoment bzw. die Drehbeschleunigung direkt proportional zur eingespritzten Kraftstoffmenge ist. Um die Drehzahlungleichförmigkeiten zu vermeiden, wird der Anteil eines jeden Verbrennungsvorgangs an der Drehbeschleunigung erfasst. Die Messwerte  
30 werden durch Bildung von Mittelwerten miteinander verglichen und auf diese Weise Abweichungen festgestellt. Die Kraftstoffeinspritzmengen der einzelnen Zylinder werden

schließlich so verändert, dass die Abweichungen verschwinden. Die Summe der Änderungen der in die einzelnen Zylindern eingespritzten Kraftstoffmenge wird so gewählt, dass sie insgesamt Null ergibt.

- 5 Bei einer Brennkraftmaschine nach der WO 97/23716 kann die Kraftstoffzufuhr eines Zylinders abgeschaltet werden, der dann beispielsweise als Kompressor arbeitet. Um in dieser Betriebsweise Schwingungen zu vermeiden, ist es vorgesehen, die Kraftstoffzufuhr zu den verbleibenden, normal arbeitenden Zylindern in geeigneter Weise zu verändern. Es soll möglich sein, durch Experimente und Berechnung festzustellen, in welcher Weise das
- 10 Drehmoment der Zylinder zu verteilen ist, um eine optimale Unterdrückung der Schwingungen zu erreichen. Für bestimmte Betriebsfälle werden auf diese Weise ermittelte Daten bereitgehalten, nach denen die Brennkraftmaschine gesteuert wird. Die Einspritzmengen werden auf die einzelnen Zylinder offensichtlich so aufgeteilt, dass die Schwingungen der 0,5-ten bis 3-ten Ordnungen unterdrückt werden, da nur sie in der
- 15 Praxis für spürbare Vibrationen verantwortlich sind. Allerdings lassen sich die Schwingungen der verschiedenen Ordnungen offensichtlich nicht immer gleichermaßen unterdrücken. Die geeignete Kraftstoffverteilung steht offenbar im Zusammenhang mit der Größe des Vektors, der für die Schwingungen verantwortlich ist.
- 20 Aus der WO 98/07971 geht ebenfalls ein Verfahren zur zylinderselektiven Steuerung einer selbstzündenden Brennkraftmaschine als bekannt hervor. Dabei dient eine Messvorrichtung zur Erfassung des Kurbelwellendrehwinkels und zur Bestimmung der momentanen Kurbelwellendrehzahl. Aus der Kurbelwellendrehzahl ermittelt ein Steuergerät geeignete Kenngrößen, die in verschiedenen Betriebsbereichen der
- 25 Brennkraftmaschine eine zylinderselektive Gleichstellung bzw. eine definierte Ungleichstellung der Mitteldrücke ermöglichen, wobei die Auswirkung von Bauteildifferenzen der Kraftstoffzuführung und des Verbrennungssystems auf den Verbrennungsvorgang minimiert werden.
- 30 In der Dissertation von Jochen Tonndorf: "Einfluß des Aussetzerbetriebes auf das Drehschwingungsverhalten von Antriebsanlagen mit Kolbenmotoren", genehmigt von der

Fakultät für Maschinenbau der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen wird das Drehschwingungsverhalten von Motoren untersucht. Dabei wird konstatiert, dass es Betriebszustände gibt, die sich wesentlich vom Normalbetrieb unterscheiden. So führen toleranzbedingte Fertigungsunterschiede bei Zylinder und Einspritzvorrichtung, aber auch  
5 im Verlauf der Betriebszeit durch Verschleiß bedingte Abweichungen zu Unterschieden gegenüber dem Normalbetrieb. Dadurch können angeblich Leistungsabweichungen der einzelnen Zylinder von etwa +/- 10 % hervorgerufen werden, was die Entstehung einer Drehschwingungserregerkraft bewirkt. Insbesondere können sich bei vielzylindrigen Motoren die Abweichungen der einzelnen Zylinder so ungünstig summieren, dass die  
10 Auswirkung die gleiche ist, als wenn ein Zylinder völlig ausgefallen ist. Des weiteren kann es durch Störungen im Einspritzsystem zum Aussetzerbetrieb kommen. Beschädigte Ein- oder Auslassventile können zum Verlust der Kompression führen. Auch das Abschalten von Zylindern stellt einen Betriebsfall dar, der die Drehschwingungsbeanspruchung verändert. Die Auswirkung der vom Normalbetrieb abweichenden Betriebszustände auf  
15 das Erregungsverhalten des Motors wird durch eine Vektordarstellung der Erregerkräfte verdeutlicht. Im weiteren wird konstatiert, dass im Aussetzerbetrieb nur die erregenden Kräfte der 0,5-ten, 1-ten und 1,5-ten Ordnung von Interesse sind. Das erregende Wechseldrehmoment errechnet sich aus der Vektorsumme entsprechend der Phasenlage der Harmonischen. Der Autor kommt jedoch zu dem Schluss, dass Eingriffe am Motor,  
20 z. B. durch Änderung des Zünddrucks praktisch nicht durchführbar sind.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Rundlaufregelung insbesondere für hochzylindrige Brennkraftmaschinen darzustellen.

25 Diese Aufgabe wird durch die im Patentanspruch 1 aufgeführten Merkmale gelöst. Während bei Brennkraftmaschinen mit wenigen Zylindern die auf die einzelnen Zylinder zurückgehenden Drehzahlanteile in der Drehzahlkurve eines Arbeitsspiels eindeutig auszumachen sind, ist dies bei hochzylindrigen Brennkraftmaschinen nicht der Fall. Vielmehr überlagern sich die Drehzahlanteile in einer Weise, dass bei Betrachtung der  
30 Drehzahlkurve keine Rückschlüsse auf den verursachenden Zylinder mehr möglich sind, was neue Auswertungsmethoden bedingt. Nichtsdestotrotz ist die erfinderische Methode

auch auf niederzylindrige Brennkraftmaschinen anzuwenden, wenn dort auch Beschränkungen aufgrund der geringen Zylinderanzahl bestehen. Für die Rundlaufregelung werden die tieffrequenten Schwingungsanteile betrachtet. Hierzu wird das Impulsantwortspektrum jedes Zylinders durch Rechnung oder Messung festgestellt. Zur

5 Feststellung des Impulsanteils eines Zylinders an der Drehgeschwindigkeit durch Messung werden die Zylinder nacheinander einzeln abgeschaltet und die Drehzahl über dem Kurbelwinkel aufgezeichnet. Außerdem wird der Drehzahlverlauf des gesunden Motors, das heißt, wenn alle Zylinder normal arbeiten, aufgenommen. Dabei kann es sich um einen Motor im Normalbetrieb handeln, der aufgrund von Toleranzen geringe Unterschiede in

10 den Drehzahlanteilen jedes Zylinders aufweist, oder um einen idealen Motor, dessen Zylinder beispielsweise durch Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens hinsichtlich ihrer Anteile an der Drehzahlbeschleunigung gleichgestellt sind. Es werden dann durch Differenzbildung des Kurvenverlaufs des gesunden Motors und der Kurvenverläufe für

15 einzeln abgeschaltete Zylinder neue Kurven erzeugt, die den Einfluss eines jeden Zylinders am Gesamtdrehzahlverlauf wiedergeben. Diese Antwortkurven werden einer Fourierzerlegung unterzogen. Es werden jedoch nur tieffrequente harmonische Schwingungen, zweckmäßigerweise der 0,5-ten bis 3-ten Ordnung betrachtet und die

20 zugehörigen spektralen Impulsantworten  $\vec{T}$  des Drehzahlverlaufs eines Arbeitsspiels jeden Zylinders aufgenommen. Im normalen Motorbetrieb wird nun ständig der Drehzahlverlauf der Kurbelwelle über dem Winkel aufgezeichnet und in analoger Weise durch Fourierzerlegung des erhaltenen Kurvenverlaufs das Spektrum des Drehzahlverlaufs

25  $\vec{R}$  eines Arbeitsspiels gebildet. Zur Darstellung des spektralen Drehzahlverlaufs werden wiederum nur die Fourierkoeffizienten der tieffrequenten Schwingungen benutzt, nämlich vorzugsweise der Harmonischen der 0,5-ten bis 3-ten Ordnung, die zu einer Zeilenmatrix

30 verarbeitet werden. Die spektralen Impulsantworten  $\vec{T}$  und die aus Fourierkoeffizienten des Drehzahlverlaufs Resultierende  $\vec{R}$  sind für jede Harmonische als Vektorzeiger über dem Kurbelwinkel darstellbar. Ist die Resultierende gleich Null, so ist keine Korrektur der Einspritzmengen erforderlich. Ist jedoch eine Resultierende gegeben, heißt das, dass in einem Zylinder eine Mindereinspritzung erfolgt, und es muss durch Korrektur der

Aufteilung der für den gegebenen Lastfall erforderlichen Gesamteinspritzmenge erfolgt in der Weise, dass die in Richtung der Impulsantwortzeiger liegenden Komponenten der Resultierenden mit den Impulsantworten  $\vec{I}$  multipliziert werden. Das Ergebnis sind Korrekturfaktoren für die Einspritzmengen. Zylinder, die in Richtung der Resultierenden  $\vec{R}$  liegen, werden mit positivem oder negativem Vorzeichen stärker korrigiert als eher orthogonal liegende. Die mathematische Operation, die die entsprechende Leistung vollbringen kann, ist die Bildung des Skalarprodukts oder des vektoriellen Inprodukts aus der Resultierenden  $\vec{R}$  und den spektralen Impulsantworten  $\vec{I}$ . Hierfür werden die erforderlichen Daten in Matrizenform zur Verfügung gehalten. Die Matrixmultiplikation der Impulsantworten  $\vec{I}$  mit dem Vektor des spektralen Drehzahlverlaufs  $\vec{R}$  ergibt von Null verschiedene Werte und führt zu einer Korrektur der Einspritzmengen, wenn eine Rundlaufabweichung im Normalbetrieb gegeben ist. Die Korrekturwerte, die normiert werden, werden einem Regler zugeführt und die Einspritzmengen  $\Delta Q$  bestimmt, die positiv oder negativ sein können und dementsprechend die vom Motorregler bestimmten Einspritzmengen für jeden Injektor eines Zylinders korrigieren.

Die Erfindung wird dargestellt anhand der Zeichnungen mit Figuren 1 bis 4. Es zeigen:

Figur 1: Einen Drehzahlregelkreis mit den für die Drehschwingungsanalyse notwendigen Elementen in schematischer Darstellung;

Figur 2: Den Drehzahlverlauf der Kurbelwelle über dem Winkel für ein Arbeitsspiel des Motors;

Figur 3: Eine spektrale Darstellung der Impulsantwort  $\vec{I}$  eines Zylinders;

Figur 4: Eine Zeigerdarstellung der Drehzahlanteile der Zylinder an der 0,5-ten Ordnung für einen Sechszylinder-Motor und zwar für einen gesunden Motor (Figur 4a), einen Motor mit fehlendem Injektor (Figur 4b) und für einen Motor mit korrigierter Einspritzmenge (4c).

In Figur 1 ist ein Drehzahlregelkreis dargestellt, wie er beispielsweise aus der DE 195 15 481 A1 als bekannt hervorgeht. Mit Bezugsziffer 1 ein Dieselmotor bezeichnet, dessen nicht dargestellte Kurbelwelle mit einem Messrad 2 verbunden ist. Mit dem Messrad 2 und einem Messwertaufnehmer 3 kann der Drehzahlverlauf der Kurbelwelle über dem Winkel aufgenommen werden. Mit einem Filter 4 und einem Filter 5 werden Störungen ausgeblendet, sowie eine Mittelung des Kurvenverlaufs durchgeführt, indem die aufgenommenen Kurvenverläufe über mehrere Arbeitsspiele hinweg abgeglichen werden. Zur Rundlaufregelung wird im normalen Motorbetrieb ständig der Drehzahlverlauf der Kurbelwelle über dem Winkel aufgezeichnet. Das Drehzahlsignal eines Arbeitsspieles ist beispielhaft in Figur 2 dargestellt. Der mit  $r$  gekennzeichnete Radius entspricht der momentanen Drehzahl beim Winkel  $\phi$ . Der Drehzahlverlauf zeigt eine Deformation, wie sie beim Ausfall eines Zylinders auftritt. Durch Fourierzerlegung der Drehzahlverlaufskurve wird der spektrale Drehzahlverlauf erhalten mit den resultierenden Vektoren  $\vec{R}_1$  bis  $\vec{R}_n$ , wobei die Indizes den betrachteten Oberwellen entsprechen. Die entsprechende Operation wird in dem symbolisch dargestellten Funktionsblock 7 ausgeführt. Die durch Fourierzerlegung erhaltenen Vektoren  $\vec{R}$  sind die Fourierkoeffizienten. Vorzugsweise werden nur die harmonischen Schwingungen der 0,5-ten bis 3-ten Ordnung betrachtet. Bei idealem Rundlauf treten keine resultierenden Anteile der entsprechenden Harmonischen auf oder sind zumindest vernachlässigbar. Real ergibt sich allerdings ein kleiner resultierender Vektor  $\vec{R}$ , da die Oberwellenanteile am Umfang nicht gleichmäßig verteilt sind. Dieser Fall ist für einen Motor mit sechs Zylindern beispielhaft für die Harmonische der 0,5-ten Ordnung in Figur 4a dargestellt. Jeder Zylinder leistet näherungsweise den gleichen Beitrag zur Drehbeschleunigung, wie die Vektorzeiger  $\vec{I}1$  bis  $\vec{I}6$  verdeutlichen. In diesem Fall erfolgt keine Korrektur der aufgrund der vorgegebenen Soll- und Ist Drehzahlen im Drehzahlregler 9 und von der Einspritzsoftware 10 ermittelten Einspritzmengen durch die jedem Zylinder zugeordneten Injektoren 11.

Die Einspritzmenge muss jedoch zylinderindividuell korrigiert werden, wenn, wie in Figur 4b dargestellt, eine auf die tieffrequenten Schwingungsanteile zurückgehende

Resultierende  $\vec{R}$  ungleich Null ist. Im entsprechenden Fall ist angenommen, dass ein

Zylinder ausgefallen ist und eine Harmonische 0,5-ter Ordnung auftritt, die die dargestellte Phasenlage in Bezug auf die Zylinder hat.

Um zur Herstellung des Rundlaufs geeignete Korrekturfaktoren für die Einspritzmengen der Injektoren berechnen zu können, muss der Impulsanteil jedes Zylinders an der Drehzahl bekannt sein. Die entsprechenden drehzahlabhängigen Daten werden im Funktionsblock 8 bereit gehalten. Zur Feststellung des Impulsanteils eines Zylinders an der Drehgeschwindigkeit werden die Zylinder in einem Messlauf nacheinander einzeln abgeschaltet und die Drehzahl über dem Kurbelwinkel aufgezeichnet. Durch Vergleich mit dem Drehzahlverlauf des gesunden Motors erhält man aus der Differenz der beiden Kurvenverläufe neue Kurvenverläufe, die die Impulsantworten  $\bar{I}$  des Motors auf die Abschaltung der Zylinder darstellen. Die Impulsantworten  $\bar{I}$  werden einer Fouriertransformation unterzogen, wobei man die spektralen Impulsantworten  $\bar{I}$  erhält. Es werden nur die auf die tieffrequenten harmonischen Schwingungen der 0,5-ten bis 3-ten Ordnung zurückgehenden Anteile betrachtet. Die spektrale Impulsantwort  $\bar{I} = (\bar{I}_{0,5}, \bar{I}_{1,0}, \bar{I}_{1,5}, \bar{I}_{2,0}, \bar{I}_{2,5}, \bar{I}_{3,0})$  eines Zylinders ist in Figur 3 dargestellt. Die Vektorzeiger verdeutlichen Betrag und Phase der entsprechenden Harmonischen. Die Impulsantworten  $\bar{I}$  werden für die mathematische Verarbeitung in Matrixform abgelegt. Durch Bildung des skalaren Inprodukts der resultierenden Vektoren  $\bar{R}$  mit den Impulsantworten  $\bar{I}$  werden Korrekturfaktoren für die Einspritzmengen der einzelnen Injektoren erzeugt. Dies erfolgt in der Multiplikationsstelle 13. Das skalare Vektorprodukt bewirkt, dass nur die in Richtung der Impulsantwortvektoren liegenden Komponenten der Resultierenden  $\bar{R}$  einen Beitrag zu den Korrekturfaktoren liefern, das heißt, dass kollineare Vektoren stark korrigiert werden und orthogonale Vektoren gar nicht korrigiert werden. In Figur 4c sind die Korrekturwerte in Form von Vektorpfeilen für die einzelnen Injektoren eingetragen. Die Korrekturfaktoren werden durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor in Einspritzmengen  $\Delta Q$  für jeden Injektor umgerechnet, die positiv oder negativ sein können und dementsprechend die vom Motorregler bestimmte Einspritzmenge  $Q$  für jeden Injektor eines Zylinders in einer Summationsstelle 12 positiv oder negativ korrigiert.



Die Berechnung erfolgt nach folgenden Gleichungen:

Bildung des Skalarprodukts:  $\vec{R}^T * \vec{I} = \vec{K}$  oder:

$$5 \quad (\vec{R}_{0,5} \vec{R}_{1,0} \vec{R}_{1,5} \vec{R}_{2,0} \vec{R}_{2,5} \dots) * \begin{pmatrix} \vec{I}_{10,5}, \vec{I}_{20,5}, \vec{I}_{30,5}, \vec{I}_{40,5}, \dots \\ \vec{I}_{11}, \vec{I}_{21}, \vec{I}_{31}, \vec{I}_{41}, \dots \\ \vec{I}_{11,5}, \vec{I}_{21,5}, \vec{I}_{31,5}, \vec{I}_{41,5}, \dots \\ \vec{I}_{12}, \dots \end{pmatrix} = (K_1 \ K_2 \ K_3 \ \dots)$$

$\vec{R}^T$  = Spektrum des Drehzahlverlaufs eines Arbeitsspiels (Transponierte)

$\vec{I}$  = Spektrale Impulsantworten

$K$  = Korrekturfaktoren für die Einspritzmenge

Durch Multiplikation der skalaren Größe  $K$  mit dem Einheitsvektor  $\vec{e}_i$ , der Impulsantwort wird  $\vec{K}$  erhalten:

$$\vec{K} = K * \vec{e}_i$$

5

Friedrichshafen, den 7. November 2000

## PATENTANSPRÜCHE

- 10 1. Verfahren zur Rundlaufregelung der Kurbelwelle einer Brennkraftmaschine, wobei die  
Beiträge der einzelnen Zylinder der Brennkraftmaschine zur Drehbeschleunigung  
anhand des Drehzahlverlaufs der Kurbelwelle bestimmt werden, und wobei die  
Einspritzmengen der den Zylindern zugeordneten Injektoren zur Einstellung definierter  
Drehzahlbeiträge zum Drehzahlverlauf variiert werden, **dadurch gekennzeichnet**,  
15 dass aufgrund errechneter oder gemessener Drehzahlverlaufskurven der Kurbelwelle  
für jeden Zylinder ein Impulsantwortspektrum  $\vec{T}$  eines Arbeitsspieles zumindest für die  
Harmonische der 0,5-ten Ordnung gebildet wird, dass im Normalbetrieb jeweils der  
Drehzahlverlauf der Kurbelwelle über dem Winkel eines Arbeitsspieles aufgenommen  
wird und durch Fouriertransformation die Fourierkoeffizienten als Resultierende  $\vec{R}$   
20 zumindest der Harmonischen der 0,5-ten Ordnung bestimmt werden, und dass im  
weiteren Korrekturfaktoren für die Einspritzmengen der einzelnen Zylinder gewonnen  
werden, indem die in Richtung der Impulsantwortvektoren liegenden Komponenten der  
Resultierenden  $\vec{R}$  mit den Impulsantworten  $\vec{T}$  multipliziert werden und durch Addition  
zusammengefasst werden.
- 25
2. Verfahren zur Rundlaufregelung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das  
Impulsantwortspektrum  $\vec{T}$  aus der Differenz der Drehzahlkurve des gesunden Motors  
und der Drehzahlkurve des Motors mit jeweils einem abgeschalteten Zylinder für  
30 jeden Zylinder durch Fouriertransformation der Differenzdrehzahlkurve gewonnen wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, aus den Impulsantworten  $\vec{T}$  und den Fourierkoeffizienten  $\vec{R}$  das Skalarprodukt gebildet wird, dessen Glieder nach Multiplikation mit dem Einheitsvektor die Korrekturfaktoren für die Einspritzmengen jedes Zylinders in Betrag und Richtung darstellen.

5

4. Verfahren nach Anspruch 1,2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die tieffrequenten Anteile mehrerer Oberwellen aus den Kurvenverläufen durch Fouriertransformation ermittelt werden und daraus Korrekturfaktoren für die Einspritzmengen jedes Zylinders dargestellt werden.

10

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Oberwellen der 0,5-ten bis 3-ten Ordnung betrachtet werden.

6. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Fourierkoeffizienten der 0,5-ten und 1-ten Ordnung benutzt werden.

15

7. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass zusätzlich die Oberwellen der 1,5-ten Ordnung berücksichtigt werden.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Koeffizienten der Fouriertransformationen in Form von Matrizen in einem Bordrechner abgelegt und abgearbeitet werden.

20

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass der gesunde Motor, zumindest was tieffrequente Harmonische anbetrifft, einen idealen Drehzahlverlauf aufweist, der durch Gleichstellung der Beiträge der Zylinder zur Drehbeschleunigung hergestellt wird.

25

30

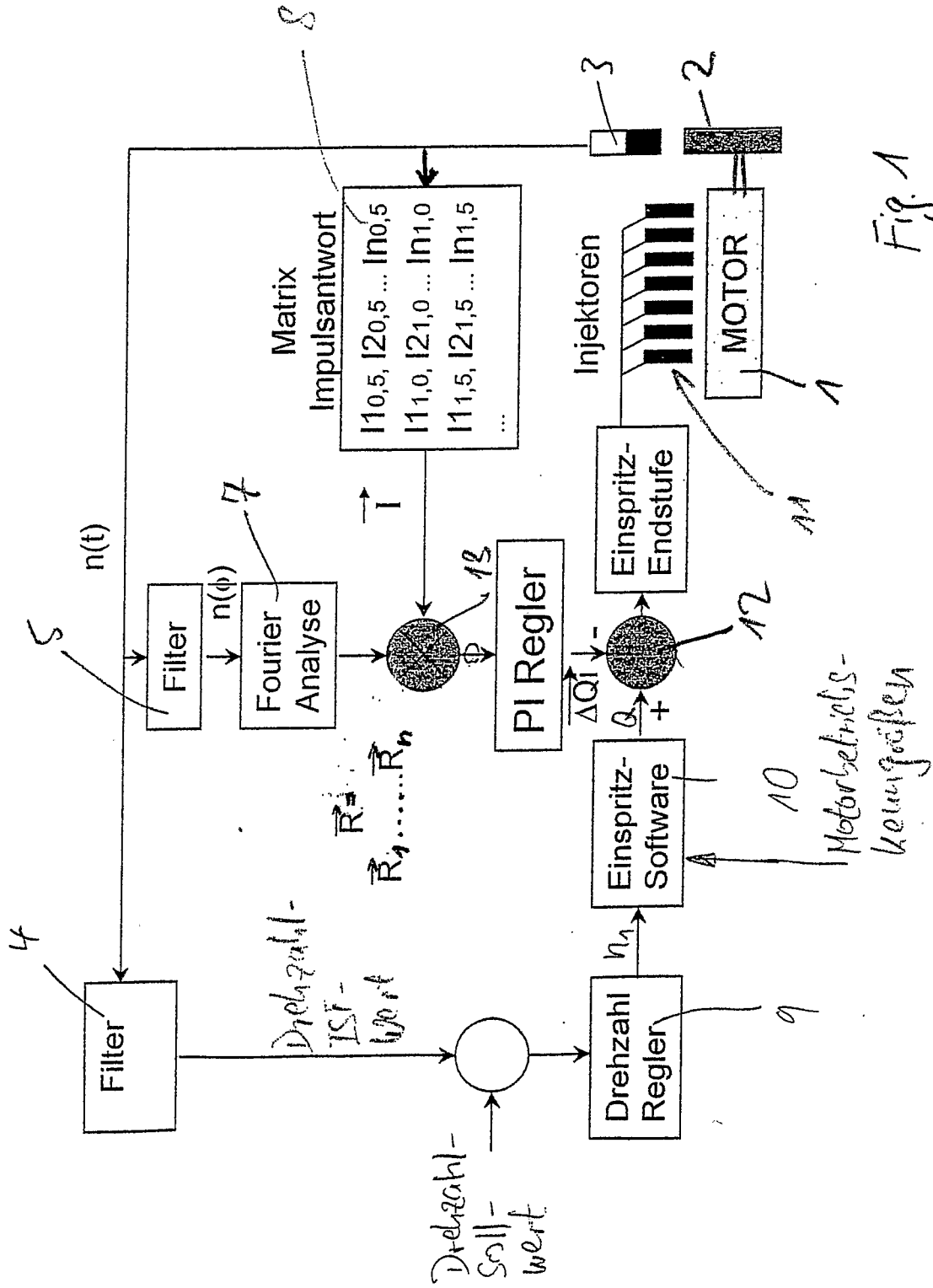


Fig. 1

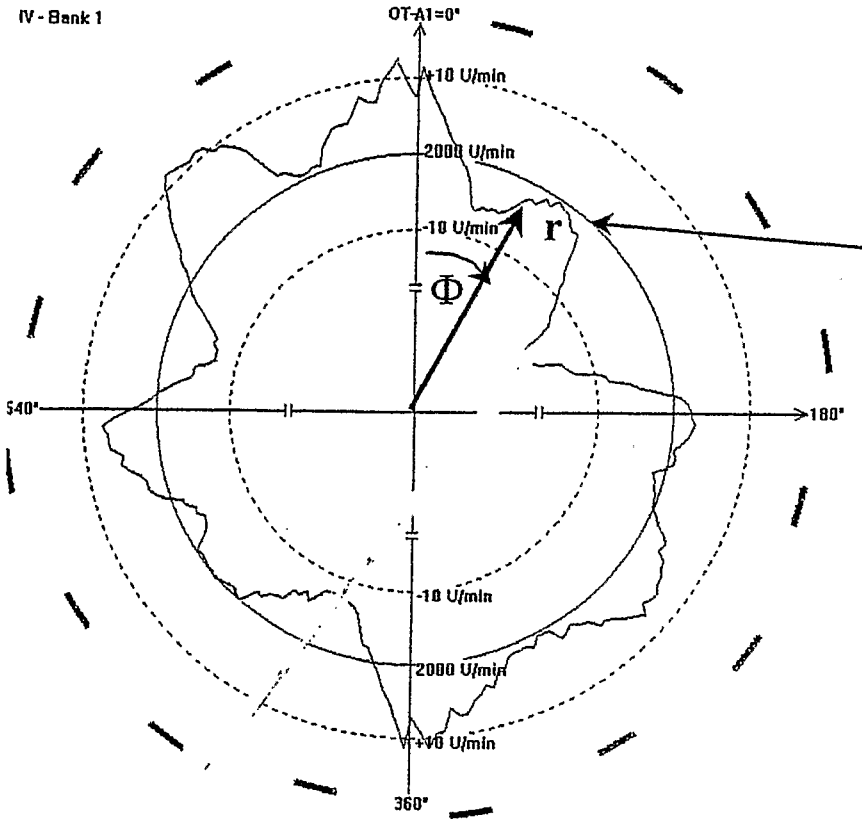


Fig. 2

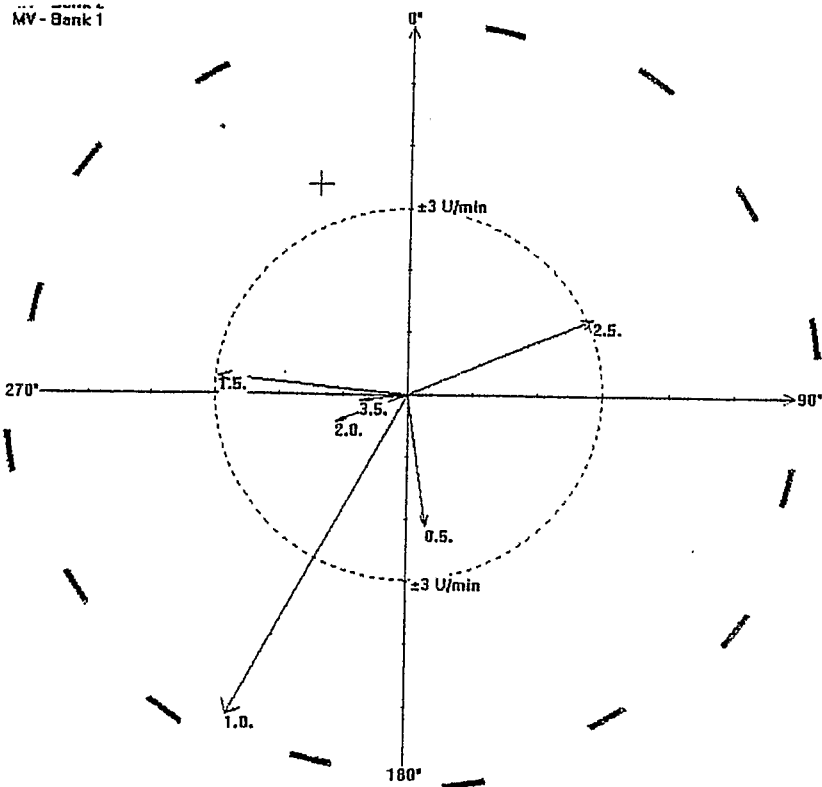


Fig. 3

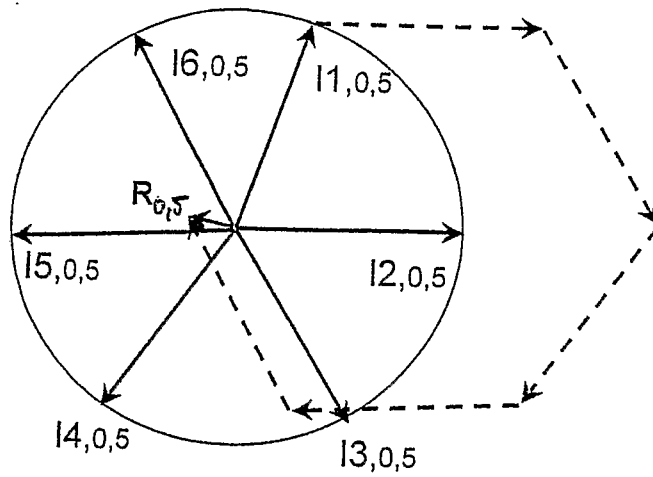


Fig. 4a

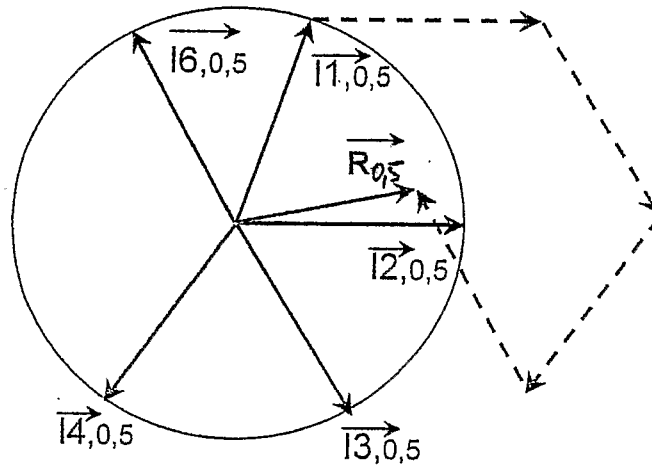


Fig. 4b

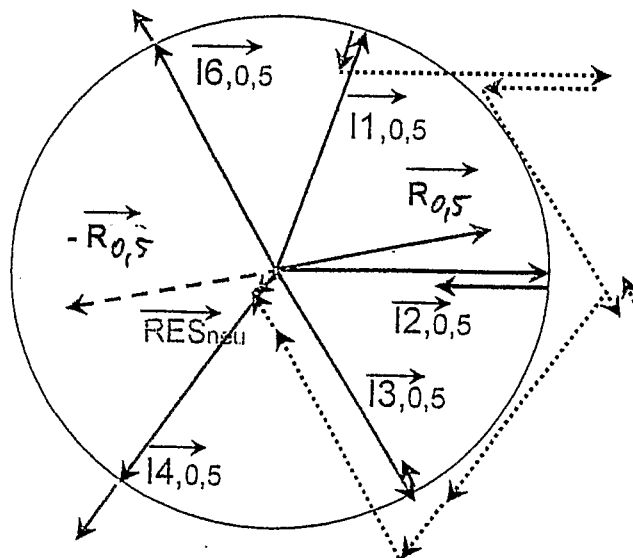


Fig. 4c