

(19)



(11)

EP 1 564 411 B2

(12)

NEUE EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT
Nach dem Einspruchsverfahren

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Entscheidung über den Einspruch:
05.08.2015 Patentblatt 2015/32

(51) Int Cl.:
F04D 15/02 (2006.01) **F04D 27/02** (2006.01)

(45) Hinweis auf die Patenterteilung:
19.03.2008 Patentblatt 2008/12

(21) Anmeldenummer: **04002979.5**

(22) Anmeldetag: **11.02.2004**

(54) Verfahren zur Ermittlung von Fehlern beim Betrieb eines Pumpenaggregates

Method for detecting operation errors of a pump aggregate

Procédé de détection des erreurs de fonctionnement d'une unité de pompage

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HU IE IT LI LU MC NL PT RO SE SI SK TR**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
17.08.2005 Patentblatt 2005/33

(73) Patentinhaber: **GRUNDFOS A/S
DK-8850 Bjerringbro (DK)**

(72) Erfinder: **Kallesoe, Carsten
8800 Viborg (DK)**

(74) Vertreter: **Vollmann, Heiko et al
Vollmann & Hemmer
Patentanwälte
Wallstrasse 33a
23560 Lübeck (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
**EP-A- 0 321 295 EP-A- 1 255 174
EP-A- 1 286 056 DE-A- 10 116 339
DE-A- 19 725 074**

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung von Fehlern beim Betrieb eines Pumpenaggregates, insbesondere eines Kreiselpumpenaggregats gemäß den im Oberbegriff des Anspruchs 1 angegebenen Merkmalen.

5 **[0002]** Aus EP-A-1 286 056 zählt es zum Stand der Technik, bei einem Pumpenaggregat Kavitation im Bereich der Pumpe mittels Sensoren zu erfassen, welche den Pumpendifferenzdruck und die Durchflussgeschwindigkeit aufnehmen. Die von den Sensoren aufgenommenen Daten werden einem Klassifizierungssystem zugeführt, welches durch ein neuronales Netzwerk bestimmt, ob und in welchem Ausmaß Kavitation vorliegt.

10 **[0003]** Aus EP-A-0 321 295 zählt es zum Stand der Technik, mittels einer Vielzahl von Sensoren hydraulische Systemdaten und mechanische Daten des Pumpenmotors zu erfassen, um kritische Betriebszustände der Pumpe zu erfassen und die Pumpe ggf. rechtzeitig abzuschalten, wenn die Pumpe z. B. trockenläuft oder gegen geschlossene Ventile fördert.

15 **[0004]** Aus Wolfram, Armin, Dominik Füssel, Torsten Brune und Rolf Isermann, Component-based multi-model approach for fault detection and diagnosis of a centrifugal pump, Institute of Autom. Control, Darmstadt University of Technology; American Control Conference, 2001: Proceedings of the 2001; Volume: 6, On page(s): 4443-4448 vol. 6; ISBN: 078036495-3, ist es bekannt, Anlagen mit darin integrierten Pumpenaggregaten zu überwachen, wobei die Überwachung einzelner Anlagenkomponenten, wie Pumpe, mechanisches System, Rohrleitung jeweils modellgestützt erfolgt, indem eine von einem mathematischen Modell errechnete Größe mit einer gemessenen verglichen und dann festgestellt wird, ob ein Fehler vorliegt oder nicht. Als Modell werden unter anderem ein Motormodell und ein Pumpenmodell verwendet. Als Eingangsgröße für die vorgenannten Modellrechnungen wird die Drehzahl verwendet.

20 **[0005]** Ein solches Überwachungssystem ist auch aus Wolfram, Armin, Komponentenbasierte Fehlerdiagnose industrielle Anlagen am Beispiel frequenzumrichtergetriebener Asynchronmaschinen und Kreiselpumpen, Dissertation TU Darmstadt, VDI Forstschriftenberichte, Reihe 8, Nr. 967, VDI Verlag 2002, Düsseldorf bekannt. Dort sind insbesondere auch die Modellzusammenhänge zwischen Motor und Pumpe beschrieben. Dieser Stand der Technik bildet den Oberbegriff des Anspruchs 1.

25 **[0006]** Es zählt also bei Pumpenaggregaten inzwischen zum Stand der Technik, eine Vielzahl von Sensorik vorzusehen, einerseits um Betriebszustände zu erfassen, andererseits auch um Fehlzustände der Anlage und/oder des Pumpenaggregats zu ermitteln. Nachteilig hierbei ist jedoch, dass die in diesem Zusammenhang erforderliche Sensorik nicht nur aufwändig und teuer, sondern häufig auch störanfällig ist.

30 **[0007]** Vor diesem Hintergrund liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Ermittlung von Fehlern beim Betrieb eines Pumpenaggregats zu schaffen, welches mit möglichst geringer Sensorik ausführbar ist.

35 **[0008]** Diese Aufgabe wird gemäß der Erfindung durch die in Anspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben sich aus den Unteransprüchen, der nachfolgenden Beschreibung und den Figuren.

40 **[0009]** Grundgedanke der vorliegenden Erfindung ist es, anhand in der Regel ohnehin zur Verfügung stehender oder zumindest wenig aufwändig ermittelbarer elektrischer Größen des Motors sowie zwei sensorisch zu ermittelnden veränderlichen hydraulischen Größe der Pumpe für den elektrischen Motor sowie die hydraulisch-mechanische Pumpe charakteristische Daten zu erfassen und diese nach mathematischer Verknüpfung auszuwerten. In einfachster Form erfolgt dies durch Vergleich mit vorgegebenen Werten, wobei sowohl der Vergleich als auch das Ergebnis selbsttätig mittels elektronischer Datenverarbeitung erfolgt, die somit feststellt, ob ein Fehler im Betrieb der Pumpe vorliegt oder nicht.

45 **[0010]** Das erfindungsgemäße Verfahren benötigt ein Minimum an Sensorik und kann bei modernem frequenzumrichtergesteuerten Pumpen, die ohnehin eine digitale Datenverarbeitung aufweisen, in der Regel softwaremäßig implementiert werden. Dabei ist besonders vorteilhaft, dass die die elektrische Leistung des Motors bestimmenden Größen, nämlich typischerweise die am Motor anliegende Spannung und der den Motor speisende Strom, ohnehin innerhalb der Frequenzumrichterelektronik zur Verfügung stehen, so dass zur Erfassung einer hydraulischen Größe, z.B. des Differenzdrucks lediglich ein Drucksensor erforderlich ist, der im Übrigen bei modernen Pumpen ebenfalls schon häufig zur Standardausstattung zählt. Die zum Vergleich erforderlichen vorgegebenen Werte können in digitaler Form in entsprechenden Speicherbausteinen der Motorelektronik abgelegt werden.

50 **[0011]** Gemäß der Erfindung ist vorgesehen, dass einerseits die zwei die elektrische Leistung des Motors bestimmenden elektrischen Größen des Motors, nämlich die am Motor anliegende Spannung und der den Motor speisende Strom, zur Erzielung mindestens eines Vergleichswertes mathematisch verknüpft werden und andererseits die mindestens eine veränderliche hydraulische Größe der Pumpe sowie eine weitere die Leistung der Pumpe bestimmende hydraulische Größe zur Erzielung mindestens eines weiteren Vergleichswerts mathematisch verknüpft werden, wobei dann anhand des Ergebnisses der mathematischen Verknüpfung durch Vergleich mit vorgegebenen Werten ermittelt wird, ob ein Fehler vorliegt oder nicht. Die mathematische Verknüpfung erfolgt dabei für die motorseitigen Daten durch entsprechende für die elektrischen und/oder magnetischen Zusammenhänge im Motor bestimmende Gleichungen wohingegen für die Pumpe Gleichungen verwendet werden, welche das hydraulische und/oder mechanische System beschreiben. Die sich bei den jeweiligen Verknüpfungen ergebenden Werte werden mit vorgegebenen, in der Speicherelektronik abgespe- 55

cherten Werten verglichen, wonach die elektronische Datenverarbeitung selbsttätig feststellt ob ein Fehler vorliegt oder nicht. Das erfindungsgemäße Verfahren hat den Vorteil, dass es wenig Speicherplatz für die vorgegebenen Werte erfordert.

5 [0012] Dabei kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren nicht nur festgestellt werden ob ein Fehler vorliegt, sondern es kann darüber hinaus vorteilhaft auch noch der Fehler spezifiziert werden, d.h. ermittelt werden, um welchen Fehler es sich handelt.

[0013] Als zu erfassende hydraulische Größe wird der von der Pumpe erzeugte Differenzdruck herangezogen, da diese Größe aggregatseitig erfasst werden kann und das Vorsehen eines solchen Druckaufnehmers bei zahlreichen Pumpenbauarten heute zum Stand der Technik zählt.

10 [0014] Zusätzlich zur Erfassung des Differenzdruckes wird als hydraulische Größe der Förderstrom der Pumpe herangezogen. Die Erfassung des Förderstroms kann ebenfalls aggregatseitig erfolgen, auch hierfür stehen wenig aufwändige und langzeitstabile Messsysteme zur Verfügung.

15 [0015] Da die Absolutdruckerfassung des von der Pumpe erzeugten Drucks stets eine Differenzdruckmessung gegenüber der Außenatmosphäre darstellt ist es häufig günstiger, den zwischen Saug- und Druckseite der Pumpe gebildeten Differenzdruck statt des Absolutdruckes zu erfassen, der darüber hinaus als hydraulische Größe der Pumpe wesentlich günstiger weiterzuverarbeiten ist.

20 [0016] Erfindungsgemäß wird für die mathematische Verknüpfung für die die elektrische Leistung des Motors bestimmenden Größen ein elektrisches Motormodell und für die mathematische Verknüpfung der mechanisch-hydraulischen Pumpengröße ein mechanisch-hydraulisches Pumpenmodell verwendet. Dabei wird als elektrisches Motormodell bevorzugt, ein durch die Gleichungen (1) bis (5) oder (6) bis (9) oder (10) bis (14) definiertes verwendet.

$$L'_s \frac{di_{sd}}{dt} = -R'_s i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} (R'_r \psi_{rd} + z_p \omega \psi_{rq}) + v_{sd} \quad (1)$$

$$25 L'_s \frac{di_{sq}}{dt} = -R'_s i_{sq} + \frac{L_m}{L_r} (R'_r \psi_{rq} - z_p \omega \psi_{rd}) + v_{sq} \quad (2)$$

$$30 \frac{d\psi_{rd}}{dt} = -R'_r \psi_{rd} - z_p \omega \psi_{rq} + R'_r L_m i_{sd} \quad (3)$$

$$35 \frac{d\psi_{rq}}{dt} = -R'_r \psi_{rq} + z_p \omega \psi_{rd} + R'_r L_m i_{sq} \quad (4)$$

$$40 T_e = z_p \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (5)$$

[0017] Die Gleichungen (1) bis (5) repräsentieren ein elektrisches dynamisches Motormodell für einen Asynchronmotor.

$$45 V_s = Z_s(s) I_s \quad (6)$$

$$45 \omega = \omega_s - s \omega_s \quad (7)$$

$$50 I_r = \frac{V_s}{Z_r(s)} \quad (8)$$

$$55 T_e = \frac{3R_r I_r^2}{s} \quad (9)$$

[0018] Die Gleichungen (6) bis (9) repräsentieren ein elektrisches statisches Motormodell ebenfalls für einen Asynchronmotor.

5 $L_s \frac{di_{sd}}{dt} = -R_s i_{sd} + z_p \omega L_s \psi_{rq} + v_{sd}$ (10)

10 $L_s \frac{di_{sq}}{dt} = -R_s i_{sq} - z_p \omega L_s \psi_{rd} + v_{sq}$ (11)

15 $\frac{d\psi_{rd}}{dt} = -z_p \omega \psi_{rq}$ (12)

20 $\frac{d\psi_{rq}}{dt} = z_p \omega \psi_{rd}$ (13)

25 $T_e = z_p \frac{3}{2} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd})$ (14)

[0019] Die Gleichungen (10) bis (14) stellen ein elektrisches dynamisches Motormodell dar, und zwar für einen Permanentmagnetmotor.

25 [0020] In den Gleichungen (1) bis (14) repräsentieren

i_{sd} den Motorstrom in Richtung d

i_{sq} den Motorstrom in Richtung q

30 ψ_{rd} den magnetischen Fluss des Rotors in d-Richtung

ψ_{rq} den magnetischen Fluss des Rotors in q-Richtung

T_e das Motormoment

35 v_{sd} die Versorgungsspannung des Motors in d-Richtung

v_{sq} die Versorgungsspannung des Motors in q-Richtung

ω die Winkelgeschwindigkeit des Rotors und Laufrades

35 R'_s den Ersatzwiderstand der Statorwicklung

R'_r den Ersatzwiderstand der Rotorwicklung

L_m den induktiven Kopplungswiderstand zwischen Stator- und Rotorwicklung

40 L'_s den induktiven Ersatzwiderstand der Statorwicklung

L_r den induktiven Widerstand der Rotorwicklung

45 z_p die Polpaarzahl

I_s den Phasenstrom

V_s die Phasenspannung

ω_s die Frequenz der Versorgungsspannung

45 ω die tatsächliche Rotor- und Laufraddrehzahl

s den Motorschlupf

$Z_s(s)$ die Statorimpedanz

$Z_r(s)$ die Rotorimpedanz

50 R_r den Ersatzwiderstand der Rotorwicklung

R_s den Ersatzwiderstand der Statorwicklung

L_s Den induktiven Widerstand der Statorwicklung,

wobei d und q zwei senkrecht zueinander stehende Richtungen senkrecht zur Motorwelle sind,

[0021] Für das mechanisch-hydraulische Pumpenmodell wird die Gleichung (15) und mindestens eine der Gleichungen (16) und (17) vorteilhaft verwendet.

55 [0022] Dabei repräsentiert die Gleichung (15) die mechanischen Zusammenhänge zwischen Motor und Pumpe wohingegen die Gleichungen (16) und (17) die mechanisch-hydraulischen Zusammenhänge in der Pumpe beschreiben. Diese Gleichungen lauten:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - B\omega - T_p \quad (15)$$

5

und mindestens eine der Gleichungen

$$H_p = -a_{h2}Q^2 + a_{h1}Q\omega + a_{h0}\omega^2 \quad (16)$$

$$T_p = -a_{t2}Q^2 + a_{t1}Q\omega + a_{t0}\omega^2 \quad (17)$$

15

in denen

$\frac{d\omega}{dt}$ die zeitliche Ableitung der Winkelgeschwindigkeit des Rotors,

T_p das Pumpendrehmoment,

J das Massenträgheitsmoment von Rotor, Laufrad und im Laufrad gebundener Förderflüssigkeit,

B die Reibungskonstante,

Q der Förderstrom der Pumpe,

H_p der von der Pumpe erzeugten Differenzdruck,

a_{h2}, a_{h1}, a_{h0} die Parameter, die den Zusammenhang zwischen Drehzahl des Laufrades, Förderstrom und Differenzdruck beschreiben und

a_{t2}, a_{t1}, a_{t0} die Parameter, die den Zusammenhang zwischen Drehzahl des Laufrades, Förderstrom und Massenträgheitsmoment beschreiben

[0023] Anspruch 4 definiert beispielhaft, in welcher Weise mathematische Verknüpfungen vorgenommen werden um zu ermitteln, ob ein Fehler vorliegt oder nicht. Grundgedanke dieses konkreten Verfahrens besteht darin, einerseits unter Zuhilfenahme des Motormodells, das sich aufgrund der elektrischen Größen an der Motorwelle ergebende Motormoment sowie die Drehzahl zu ermitteln. Mit Hilfe der Gleichungen (16) und (17) wird eine Beziehung zwischen Differenzdruck und Förderstrom einerseits bzw. zwischen Pumpendruckmoment und Förderstrom andererseits ermittelt.

[0024] Um dem System eine gewisse Toleranz zu geben, kann es sinnvoll sein, durch Varianz mindestens einer der Größen a_{h0} bis a_{h2} , a_{t0} bis a_{t2} , B und J ein Toleranzband festzulegen, um nur dann einen Fehler zu registrieren, wenn dieser auch betriebsrelevant ist.

[0025] Um die Art des Fehlers näher spezifizieren zu können, werden zusätzlich zu den zwei elektrischen Größen zwei hydraulische Größen durch Messen ermittelt und die ermittelten Werte in die Gleichungen nach Anspruch 4 eingesetzt, so dass sich dann vier Fehlergrößen r_1 bis r_4 ergeben. Anhand der Kombination dieser Fehlergrößen wird dann die Art des Fehlers anhand vorgegebener Grenzwertkombinationen bestimmt. Auch dies erfolgt selbsttätig durch die elektronische Datenverarbeitung.

[0026] In alternativer Weiterbildung des erfundungsgemäßen Verfahrens werden zur Ermittlung der Art des Fehlers zusätzlich zu den zwei elektrischen Größen die zwei vorhergenannten hydraulischen Größen durch Messen ermittelt und die ermittelten Werte mit vorgegebenen Werten verglichen werden, wobei dann jeweils die vorgegebenen Werte eine Fläche im dreidimensionalen Raum definieren und ermittelt wird, ob die ermittelten Größen auf diesen Flächen (r_1^* bis r_4^*) liegen oder nicht und anhand der Kombination der Werte die Art des Fehlers anhand vorgegebener Grenzwertkombinationen ermittelt werden. Die Fehlerart kann dann beispielsweise anhand der folgenden Tabelle bestimmt werden:

Fehlerart	Fehlergröße	r_1	r_2	r_3	r_4
		r_1^*	r_2^*	r_3^*	r_4^*
Erhöhte Reibung aufgrund mechanischer Defekte		1	0	1	1
Reduzierte Förderung/fehlender Differenzdruck		0	1	1	1
Defekt im Ansaugbereich/fehlender Förderstrom		1	1	0	1
Förderausfall		1	1	1	1

[0027] Mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens ist es somit möglich, mit einem Minimum an Sensorik nicht nur den fehlerfreien Betriebszustand des Pumpenaggregats festzustellen oder nicht festzustellen, sondern darüber hinaus im Falle eines Fehlers diesen auch noch im Einzelnen zu spezifizieren, so dass im Pumpenaggregat ein entsprechendes Fehlersignal generiert werden kann, das die Art des Fehlers anzeigt. Dieses Signal kann gegebenenfalls zu entfernten Stellen übermittelt werden, wo die Funktion des Pumpenaggregats überwacht werden soll.

[0028] Die anhand vorgegebener Werte gebildeten Flächen im dreidimensionalen Raum sind typischerweise raumgekrümmte Flächen, deren Werte zuvor fabrikmäßig anhand des jeweiligen Aggregats oder des Aggregattyps ermittelt und im digitalen Datenspeicher aggregatseitig abgelegt sind. Dabei sind die vorerwähnten Vergleichsflächen r^*_1 bis r^*_4 in einem dreidimensionalen Raum angeordnet, der bei r^*_1 aus dem Drehmoment, dem Durchfluss und der Drehzahl, bei r^*_2 aus dem Differenzdruck, dem Förderstrom und der Drehzahl, für r^*_3 aus dem Drehmoment, dem Differenzdruck und der Drehzahl sowie für r^*_4 aus dem Drehmoment, dem Differenzdruck und dem Förderstrom gebildet sind.

[0029] Die in der Tabelle durch die Vergleichsflächen r^*_1 bis r^*_4 definierten Größen kennzeichnen den jeweiligen Betriebszustand, wobei die Ziffer 0 bedeutet, dass der jeweilige Wert innerhalb der durch die vorgegebenen Werte definierten Fläche liegt und 1 außerhalb. So kann die in der Tabelle durch erhöhte Reibung aufgrund mechanischer Defekte definierte Fehlerkombination beispielsweise einen Lagerschaden oder einen sonstwie verursachten erhöhten Reibwiderstand zwischen den rotierenden Teilen und den feststehenden Teilen des Aggregats bedeuten. Die unter dem Oberbegriff reduzierte Förderung/fehlender Differenzdruck gekennzeichnete Fehlerkombination kann beispielsweise durch Fehler oder Verschleiß am Pumpenlaufrad oder ein Hindernis im Pumpen Einoder Auslass verursacht sein. Die unter dem Oberbegriff Defekt im Ansaugbereich/fehlender Förderstrom definierte Fehlerkombination kann beispielsweise durch Defekt der Ringdichtung am Saugmund der Pumpe verursacht sein. Die unter dem Oberbegriff Förderausfall fallende Fehlerkombination kann vielfältigste Ursachen haben und ist ggfs. weiter zu spezifizieren. Dieser Förderausfall kann durch eine blockierte Welle oder ein blockiertes Pumpenlaufrad, durch einen Wellenbruch, durch das Lösen des Pumpenlaufrads, durch Kavitation aufgrund unzulässig niedrigen Differenzdrucks am Pumpeneinlass sowie durch Trockenlauf verursacht sein.

[0030] Die in der Tabelle durch die Größen r_1 bis r_4 gekennzeichneten Betriebszustände basieren auf mathematischen Berechnungen von Fehlergrößen r_1 bis r_4 entsprechend den Gleichungen (19) bis (22), wobei die entsprechende Fehlergröße den Wert Null annimmt, wenn ein einwandfreier Betrieb vorliegt und den Wert 1 im Falle eines Fehlers. Die Tabelle ist hinsichtlich der Fehlerart in entsprechender Weise wie oben beschrieben zu verstehen. Bildlich gesehen, repräsentiert jede der Fehlergrößen r_1 bis r_4 einen Abstand zu den entsprechenden Flächen r^*_1 bis r^*_4 . Jedoch müssen die Fehlergrößen nicht notwendigerweise mit den Flächen r^*_1 bis r^*_4 korrespondieren. Die Fehlergrößen r_1 bis r_4 entsprechen den Gleichungen (19) bis (22) und korrespondieren zu den Flächen r^*_1 bis r^*_4 in den Figuren 4 bis 9.

[0031] Um die Art des Fehlers weiter zu differenzieren ist in einer Weiterbildung der Erfindung vorgesehen, dass bei Ermittlung eines Fehlers das Pumpenaggregat mit geänderter Drehzahl angesteuert wird, um dann anhand der sich einstellenden Messergebnisse den ermittelten Fehler näher eingrenzen zu können.

[0032] Die Fehlergrößen r_1 bis r_4 werden vorteilhaft durch die Gleichungen (19) bis (22) definiert:

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\hat{\omega}_1}{dt} = -B\hat{\omega}_1 - (-a_{12}Q^2 + a_{11}Q\omega + a_{10}\omega^2) + T_e + k_e(\omega - \hat{\omega}_1) \\ r_1 = q_1(\omega - \hat{\omega}_1) \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r_2 = q_2(-a_{h2}Q^2 + a_{h1}Q\omega + a_{h0}\omega^2 - H_p) \end{array} \right. \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q' = \frac{a_{h1}\omega + \sqrt{a_{h1}^2\omega^2 - 4a_{h2}(H_p + a_{h0}\omega^2)}}{2a_{h2}} \\ J \frac{d\hat{\omega}_3}{dt} = -B\hat{\omega}_3 - (-a_{12}Q'^2 + a_{11}Q'\omega + a_{10}\omega^2) + T_e + k_3(\omega - \hat{\omega}_3) \\ r_3 = q_3(\omega - \hat{\omega}_3) \end{array} \right. \quad (21)$$

$$\left\{
 \begin{array}{l}
 \omega' = \frac{-a_{h1}H_p + \sqrt{a_{h1}^2H_p^2 - 4a_{h2}(H_p + a_{10}Q^2)}}{2a_{h2}} \\
 J \frac{d\hat{\omega}_4}{dt} = -B\hat{\omega}_4 - \left(-a_{12}Q^2 + a_{11}Q\omega' + a_{10}\omega'^2 \right) + T_e + k_4(\omega' - \hat{\omega}_4) \\
 r_4 = q_4(\omega' - \hat{\omega}_4)
 \end{array}
 \right. \quad (22)$$

in denen

- k_1, k_3, k_4 Konstanten,
 q_1, q_2, q_3, q_4 Konstanten,
 Q' Der berechnete Förderstrom auf Basis von aktueller Drehzahl und gemessenem Differenzdruck,
 $\hat{\omega}_1$ die berechnete Rotordrehzahl auf Grundlage der mechanisch-hydraulischen Gleichungen (15) und (17),
 $\hat{\omega}_3$ die berechnete Rotordrehzahl auf Grundlage der Gleichungen (15), (16) und (17),
 $\hat{\omega}_4$ die berechnete Rotordrehzahl auf Grundlage der Gleichungen (15), (16) und (17),
 ω' die berechnete Rotordrehzahl aufgrund gemessenen Differenzdrucks und gemessenem Förderstrom
 r_1-r_4 Fehlergrößen und
 $r_1^* - r_4^*$ durch drei Variable bestimmte Flächen sind, die einen fehlerfreien Betrieb der Pumpe repräsentieren.

[0033] Erfindungsgemäß ist hier also eine Sensorik zur Erfassung von der am Motor anliegenden Versorgungsspannung und des Versorgungsstroms sowie zur Erfassung des von der Pumpe aufgebrachten Differenzdrucks und dem Förderstrom vorgesehen. Darüber hinaus ist eine Auswerteinrichtung vorzusehen, die in Form einer digitalen Datenverarbeitung, z. B. eines Mikroprozessors ausgebildet sein kann, in den das erfindungsgemäß Verfahren softwaremäßig implementiert wird. Um den Vergleich zwischen erfassten bzw. berechneten Werten und vorgegebenen (z.B. fabrikseitig erfasst und abgespeicherten) Werten durchführen zu können ist ferner ein elektronischer Speicher vorzusehen. Bei modernen frequenzumrichtersteuerten Pumpenaggregaten sind sämtliche vorgenannten hardwaremäßigen Voraussetzungen bereits vorhanden, so dass lediglich für eine ausreichende Dimensionierung der elektronischen Datenverarbeitungsanlage, insbesondere der Speichermittel und der Auswerteinrichtung zu sorgen ist. Sämtliche Bauteile mit Ausnahme der zur Erfassung von hydraulischen Größen erforderlichen Sensorik sind bevorzugt integraler Bestandteil der Motor- und/oder Pumpenelektronik, so dass konstruktiv insoweit keine weiteren Vorkehrungen zur Durchführung des erfindungsgemäß Verfahrens zu treffen sind. Eine andere Ausführungsform kann ein separater in einer Schalttafel oder Steuertafel vorgesehener Baustein sein, in gleicher Weise wie ein Motorschutzschalter, jedoch mit den Überwachungs- und Diagnoseeigenschaften wie oben beschrieben.

[0034] Die hier beschriebenen Ausführungsformen beziehen sich auf Kreiselpumpen, wie sich dies auch aus dem mechanisch-hydraulischen Pumpenmodell ergibt. Solche Pumpen können beispielsweise Industriepumpen, Tauchpumpen für die Abwasser- oder Wasserversorgung sowie Heizungsumwälzpumpen sein. Besonders vorteilhaft ist ein Diagnosesystem gemäß der Erfindung bei Spaltrohrpumpen, da durch frühzeitige Fehlererkennung das Durchschleifen des Spaltrohres und damit Austritt von Förderflüssigkeit, z. B. in den Wohnbereich, vorbeugend verhindert wird. Bei der Anwendung der Erfindung im Verdrängerpumpenbereich muss das mechanisch-hydraulische Pumpenmodell entsprechend den abweichenden physikalischen Zusammenhängen angepasst werden. Entsprechendes gilt auch beim Einsatz anderer Motortypen für das elektrische Motormodell.

[0035] Darüber hinaus sind gemäß der Erfindung Mittel vorgesehen um mindestens eine Fehlermeldung zu erzeugen und zu übertragen an ein am Pumpenaggregat oder anderswo angeordnetes Anzeigeelement, sei es in Form einer oder mehrerer Kontrollleuchten oder eines Displays mit alphanumerischer Anzeige. Dabei kann die Übertragung drahtlos, beispielsweise über Infrarot oder Funk erfolgen aber auch drahtgebunden, vorzugsweise in digitaler Form.

[0036] Ein vereinfachtes Verfahren, das nicht zur Erfindung gehört, ist anhand von Fig. 1 dargestellt. In ein elektrisches Motormodell 1 fließen die veränderlichen elektrischen leistungsbestimmenden Größen ein, hier die Spannung V_{abc} und der Strom i_{abc} . Das Produkt dieser Größen definiert die vom Motor aufgenommene elektrische Leistung. Aus diesem Motormodell, wie es beispielsweise durch die Gleichungen (1) bis (5) oder (6) bis (9) oder (10) bis (14) gegeben ist, sind das Drehmoment T_e an der Welle des Motors sowie die Drehzahl ω des Motors ableitbar, wie sie sich rechnerisch aufgrund des Motormodells ergeben. Diese leistungsabhängigen elektrischen Größen des Motors werden mit der ermittelten mechanischen Förderhöhe H (Differenzdruck) in einem Pumpenmodell 2, beispielsweise nach den Gleichungen (16) und (17) verknüpft, wobei dann das Ergebnis mit anhand definierter Betriebspunkte ermittelter vorgegebener Betriebswerte verglichen wird. Bei Übereinstimmung dieser Eingangsgrößen mit den vorgegebenen Werten arbeitet das Pumpenaggregat fehlerfrei. Ergibt sich hingegen über ein vorbestimmtes Maß hinausgehende Differenz, so wird ein Fehlersignal r generiert, welches eine Fehlfunktion der Pumpe signalisiert.

[0037] Bei der erfindungsgemäß Ausführung gemäß Fig. 2 werden in gleicher Weise wie bei Fig. 1 die Eingangs-

spannung V_{abc} und der Motorstrom i_{abc} als Eingangswerte für das Motormodell 1 verwendet, um das an der Motorwelle anstehende Moment T_e und die Drehgeschwindigkeit der Welle ω zu ermitteln. Diese aus dem Motormodell 1 abgeleiteten Werte sowie die sensorisch ermittelten Größen der Förderhöhe H (Differenzdruck) sowie der Förderstrom Q werden in einem mechanisch-hydraulischen Pumpenmodell 3 mathematisch miteinander verknüpft, das z.B. durch die 5 Gleichungen (19) bis (22) weitergebildet ist. Hierbei werden vier Fehlergrößen r_1 bis r_4 generiert, wobei ein fehlerfreier Betrieb vorliegt, wenn diese alle den Wert Null annehmen und damit die Betriebspunkte in den in den Figuren 4 bis 7 im Einzelnen dargestellten Flächen r_1^* bis r_4^* liegen. Diese dort dargestellten Flächen sind aus einer Vielzahl von 10 Betriebspunkten beim ordnungsgemäßen Betrieb des Pumpenaggregats definiert und fabrikmäßig erzeugt und im Speicherbaustein der Auswertelektronik digital abgespeichert. Alternativ oder zusätzlich wird festgestellt, ob die anhand des mechanisch-hydraulischen Pumpenmodells ermittelten Fehlergrößen r_1 bis r_4 Null sind oder nicht, entsprechend diesem Ergebnis erfolgt eine Auswertung gemäß der vorbeschriebenen Tabelle. Je nachdem, ob eine Fehlergröße vorliegt oder nicht, können beim Auftreten eines Fehlers insgesamt vier fehlerhafte Betriebszustände des Pumpenaggregats festgestellt werden, und zwar die unter die vorgenannten Oberbegriffe fallenden:

- 15 1. erhöhte Reibung aufgrund mechanischer Defekte,
2. reduzierte Förderung/fehlender Differenzdruck,
3. Defekt im Ansaugbereich/fehlender Förderstrom und
4. Förderausfall.

20 [0038] Die vorstehend beschriebenen Gleichungen zur mathematischen Beschreibung von Pumpe und Motor sind nur beispielhaft zu verstehen und können ggfs. durch andere geeignete Gleichungen, wie sie aus der einschlägigen Fachliteratur bekannt sind, ersetzt werden. Die vorstehend mit diesen Modellen ermittelbaren Fehler beim Betrieb eines Pumpenaggregats bzw. Differenzierung nach Fehlerarten kann weiter diversifiziert werden durch geeignete Fehleralgorithmen.

25 [0039] Um sicherzustellen, dass nicht schon geringe Fertigungstoleranzen oder Messfehler zur Abgabe von Fehler-signalen führen, ist es zweckmäßig, die in den Gleichungen (16) und (17) angegebenen Parameter a_h und a_t nicht konstant zu wählen, sondern jeweils einen unteren oder oberen Grenzwert festzusetzen, um eine gewisse Bandbreite zu erzeugen, wie sie in Fig. 3 dargestellt sind. In der dort dargestellten linken Kurve ist die Leistung über dem Förderstrom und in der rechten Kurve die Förderhöhe (Differenzdruck) über dem Förderstrom aufgetragen.

30 Bezugszeichenliste

[0040]

- 35 1 - Elektrisches Motormodell
- 2 - Vereinfachtes Pumpenmodell
- 3 - Erweitertes Pumpenmodell
- 4 - Hydraulischer Teil der Anlage

40 Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung von Fehlern beim Betrieb eines Pumpenaggregats, bei dem mindestens zwei die elektrische Leistung des Motors bestimmende elektrische Größen des Motors und mindestens eine veränderliche hydraulische Größe der Pumpe sowie mindestens eine weitere die Leistung der Pumpe bestimmende hydraulische Größe erfasst werden und einerseits die zwei die elektrische Leistung des Motors bestimmenden elektrischen Größen des Motors zur Erzielung mindestens eines Vergleichswertes und andererseits die mindestens eine veränderliche hydraulische Größe der Pumpe sowie die mindestens eine weitere die Leistung der Pumpe bestimmende hydraulische Größe zur Erzielung mindestens eines Vergleichswertes mathematisch verknüpft werden, wobei für die mathematische Verknüpfung ein mathematisches elektrisches Motormodell (1) in Verbindung mit einem mathematischen mechanisch-hydraulischen Pumpenmodell (3) verwendet wird und anhand der Ergebnisse der mathematischen Verknüpfungen durch Vergleich mit vorgegebenen Werten ermittelt wird, ob ein Fehler vorliegt oder nicht, wobei die Eingangsspannung V_{abc} und der Motorstrom i_{abc} als Eingangswerte für das Motormodell (1) verwendet wird um das an der Motorwelle anstehende Moment T_e zu ermitteln **F1 dadurch gekennzeichnet, dass** die Drehgeschwindigkeit der Welle ω aus dem Motormodell ermittelt wird und diese aus dem Motormodell (1) abgeleiteten Werte sowie die sensorisch ermittelten Größen der Förderhöhe H Differenzdruck sowie der Förderstrom Q in dem mechanisch-hydraulischen Pumpenmodell (3) mathematisch miteinander verknüpft werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** dann, wenn das Vorliegen eines Fehlers ermittelt wird, weiter ermittelt wird, um welchen Fehler es sich handelt.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das elektrische Motormodell (1) durch folgende Gleichungen

$$L'_s \frac{di_{sd}}{dt} = -R'_s i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} (R'_r \psi_{rd} + z_p \omega \psi_{rq}) + v_{sd} \quad (1)$$

10

$$L'_s \frac{di_{sq}}{dt} = -R'_s i_{sq} + \frac{L_m}{L_r} (R'_r \psi_{rq} - z_p \omega \psi_{rd}) + v_{sq} \quad (2)$$

15

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = -R'_r \psi_{rd} - z_p \omega \psi_{rq} + R'_r L_m i_{sd} \quad (3)$$

20

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = -R'_r \psi_{rq} + z_p \omega \psi_{rd} + R'_r L_m i_{sq} \quad (4)$$

$$T_e = z_p \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (5)$$

25

oder

$$V_s = Z_s(s) I_s \quad (6)$$

30

$$\omega = \omega_s - s \omega_s \quad (7)$$

35

$$I_r = \frac{V_s}{Z_r(s)} \quad (8)$$

40

$$T_e = \frac{3R_r I_r^2}{s} \quad (9)$$

oder

45

$$L_s \frac{di_{sd}}{dt} = -R_s i_{sd} + z_p \omega L_s \psi_{rq} + v_{sd} \quad (10)$$

50

$$L_s \frac{di_{sq}}{dt} = -R_s i_{sq} - z_p \omega L_s \psi_{rd} + v_{sq} \quad (11)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = -z_p \omega \psi_{rq} \quad (12)$$

55

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = z_p \omega \psi_{rd} \quad (13)$$

$$T_e = z_p \frac{3}{2} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (14)$$

- 5 gebildet wird, in denen
 i_{sd} den Motorstrom in Richtung d
 i_{sq} den Motorstrom in Richtung q
 ψ_{rd} den magnetischen Fluss des Rotors in d-Richtung
 ψ_{rq} den magnetischen Fluss des Rotors in q-Richtung
10 T_e das Motormoment
 v_{sd} die Versorgungsspannung des Motors in d-Richtung
 v_{sq} die Versorgungsspannung des Motors in q-Richtung
 ω die Winkelgeschwindigkeit des Rotors und Laufrades
 R'_s den Ersatzwiderstand der Statorwicklung
15 R'_r den Ersatzwiderstand der Rotorwicklung
 L_m den induktiven Kopplungswiderstand zwischen Stator- und Rotorwicklung
 L'_s den induktiven Ersatzwiderstand der Statorwicklung
 L_r den induktiven Widerstand der Rotorwicklung
20 z_p die Polpaarzahl
 I_s den Phasenstrom
 V_s die Phasenspannung
 ω_s die Frequenz der Versorgungsspannung
 ω die tatsächlich Rotor- und Laufraddrehzahl
25 s den Motorschlupf
 $Z_s(s)$ die Statorimpedanz
 $Z_r(s)$ die Rotorimpedanz
 R_r den Ersatzwiderstand der Rotorwicklung
 R_s den Ersatzwiderstand der Statorwicklung
30 L_s Den induktiven Widerstand der Statorwicklung,
wobei d und q zwei senkrecht zueinander stehende Richtungen senkrecht zur Motorwelle sind,
ist und dass das mechanisch-hydraulische Pumpen-/Motormodell durch eine Gleichung

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - B\omega - T_p \quad (15)$$

35 und mindestens eine der Gleichungen

$$H_p = -a_{h2}Q^2 + a_{h1}Q\omega + a_{h0}\omega^2 \quad (16)$$

$$T_p = -a_{t2}Q^2 + a_{t1}Q\omega + a_{t0}\omega^2 \quad (17)$$

- 40 gebildet wird, in denen
 $\frac{d\omega}{dt}$ die zeitliche Ableitung der Winkelgeschwindigkeit des Rotors,
50 T_p das Pumpendrehmoment,
 J das Massenträgheitsmoment von Rotor, Laufrad und im Laufrad gebundener Förderflüssigkeit ,
 B die Reibungskonstante,
 Q der Förderstrom der Pumpe,
 H_p der von der Pumpe erzeugten Differenzdruck,
55 a_{h2}, a_{h1}, a_{h0} die Parameter, die den Zusammenhang zwischen Drehzahl des Laufrades, Förderstrom und Differenzdruck beschreiben und
 a_{t2}, a_{t1}, a_{t0} die Parameter, die den Zusammenhang zwischen Drehzahl des Laufrades, Förderstrom und Massen-

trägheitsmoment beschreiben
sind.

5. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** in den Gleichungen (16) und (17) die Größen a_{h0} - a_{h2} und a_{l0} - a_{l2} festgelegt werden, sowie in der Gleichung (15) die Größen B und J, dass aus dem elektrischen Motor-
modell (1) gemäß den Gleichungen (1) - (5) oder (6) - (9) oder (10) - (14) ein Motormoment (T_e) ermittelt wird und
die Drehzahl nach den Gleichungen (1) - (5) oder (6) - (9) oder (10) - (14) berechnet wird, wonach mit Hilfe der
Gleichungen (16) und (17) eine Beziehung zwischen Differenzdruck und Förderstrom einerseits und zwischen
Pumpenmoment und Förderstrom andererseits ermittelt wird.
10. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** durch Varianz mindestens einer der Größen a_{h0} - a_{h2} und a_{l0} - a_{l2} und B und J ein Toleranzband festgelegt wird.
15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Ermittlung der Art des
Fehlers die ermittelten Werte in die Gleichungen nach Anspruch 4 eingesetzt werden, derart, dass sich mehrere
Fehlergrößen (r_1 - r_4) ergeben, wobei anhand der Kombination der Fehlergrößen die Art des Fehlers anhand vorge-
gebener Grenzwertkombinationen ermittelt wird.
20. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die ermittelten Werte oder
davon abgeleitete Werte mit vorgegebenen Werten verglichen werden, wobei die vorgegebene Werte jeweils eine
Fläche definieren, wobei ermittelt wird, ob die ermittelten oder die davon abgeleiteten Größen auf einer dieser
Flächen (r_1^* - r_4^*) liegen oder nicht, und anhand der Kombination der Fehlergrößen die Art des Fehlers anhand
vorgegebener Grenzwertkombinationen ermittelt wird.
25. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ermittlung der Fehlerart
anhand der folgenden Tabelle erfolgt

Fehlerart	Fehlergröße	r_1	r_2	r_3	r_4
	Vergleichsfläche	r_1^*	r_2^*	r_3^*	r_4^*
Erhöhte Reibung aufgrund mechanischer Defekte	1	0	1	1	
Reduzierte Förderung/ fehlender Differenzdruck	0	1	1	1	
Defekt im Ansaugbereich/ fehlender Förderstrom	1	1	0	1	
Förderausfall	1	1	1	1	

30. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei Ermittlung eines Feh-
lers das Pumpenaggregat mit geänderter Drehzahl angesteuert wird, um anhand der sich dann einstellenden Mes-
sergebnisse den ermittelten Fehler näher zu spezifizieren.
40. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Größen r_1 - r_4 durch
die Gleichungen

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\hat{\omega}_1}{dt} = -B \hat{\omega}_1 - (-a_{l2} Q^2 + a_{l1} Q \omega + a_{l0} \omega^2) + T_e + k_e (\omega - \hat{\omega}_1) \\ r_1 = q_1 (\omega - \hat{\omega}_1) \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r_2 = q_2 (-a_{h2} Q^2 + a_{h1} Q \omega + a_{h0} \omega^2 - H_p) \end{array} \right. \quad (20)$$

$$\begin{cases}
 Q' = \frac{a_{h1}\omega + \sqrt{a_{h1}^2\omega^2 - 4a_{h2}(H_p + a_{h0}\omega^2)}}{2a_{h2}} \\
 J \frac{d\hat{\omega}_3}{dt} = -B\hat{\omega}_3 - (-a_{i2}Q'^2 + a_{i1}Q'\omega + a_{i0}\omega^2) + T_e + k_3(\omega - \hat{\omega}_3) \\
 r_3 = q_3(\omega - \hat{\omega}_3)
 \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases}
 \omega' = \frac{-a_{h1}H_p + \sqrt{a_{h1}^2H_p^2 - 4a_{h2}(H_p + a_{h0}Q^2)}}{2a_{h2}} \\
 J \frac{d\hat{\omega}_4}{dt} = -B\hat{\omega}_4 - (-a_{i2}Q^2 + a_{i1}Q\omega' + a_{i0}\omega'^2) + T_e + k_4(\omega' - \hat{\omega}_4) \\
 r_4 = q_4(\omega' - \hat{\omega}_4)
 \end{cases} \quad (22)$$

definiert sind, in denen

k_1, k_3, k_4 Konstanten,

q_1, q_2, q_3, q_4 Konstanten,

Q' Der berechnete Förderstrom auf Basis von aktueller Drehzahl und gemessenem Differenzdruck,

$\hat{\omega}_1$ die berechnete Rotordrehzahl auf Grundlage der mechanisch-hydraulischen Gleichungen (15) und (17).

$\hat{\omega}_3$ die berechnete Rotordrehzahl auf Grundlage der Gleichungen (15), (16) und (17),

$\hat{\omega}_4$ die berechnete Rotordrehzahl auf Grundlage der Gleichungen (15), (16) und (17),

ω' die berechnete Rotordrehzahl aufgrund gemessenen Differenzdrucks und gemessenem Förderstrom

$r_1 - r_4$ Fehlergrößen und

$r_1^* - r_4^*$ durch drei Variable bestimmte Flächen sind, die einen fehlerfreien Betrieb der Pumpe repräsentieren.

Claims

1. A method for determining faults on operation of a pump assembly, with which at least two electrical variables of the motor which determine the electrical power of the motor, and at least one changing hydraulic variable of the pump, as well as at least one further hydraulic variable which determines the power of the pump are acquired, and on the one hand, the two electrical variables of the motor which determine the electrical power of the motor, are mathematically linked for achieving at least one comparison value, and on the other hand the at least one changing hydraulic variable of the pump, as well as at least one further hydraulic variable determining the power of the pump are mathematically linked for achieving at least one comparison value, wherein a mathematical, electrical motor model (1) is used in combination with a mathematical, mechanical-hydraulic pump model (3) for the mathematical linking, and one determines whether a fault is present or not by way of the results of the mathematical linkings by comparison with predefined values, wherein the input voltage V_{abc} and the motor current i_{abc} are used as input values for the motor model (1), in order to determine the moment T_e which is present at the motor shaft, **characterised in that** the rotation speed of the shaft ω is determined from the motor model and these values which are derived from the motor model (1) as well as the variables of the delivery head H , differential pressure as well as the delivery flow Q which are determined by sensor are mathematically linked to one another in the mechanical-hydraulic pump model (3).
2. A method according to claim 1, **characterised in that** if the presence of a fault is determined, one then further determines as to which fault it is a case of.
3. A method according to one of the preceding claims, **characterised in that** the electrical motor model (1) is formed by the following equations

$$L_s' \frac{di_{sd}}{dt} = -R_s' i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} (R_r' \psi_{rd} + z_p \omega \psi_{rq}) + v_{sd} \quad (1)$$

$$L_s \frac{di_{sq}}{dt} = -R_s i_{sq} + \frac{L_m}{L_r} (R_r \psi_{rq} - z_p \omega \psi_{rd}) + v_{sq} \quad (2)$$

$$5 \quad \frac{d\psi_{rd}}{dt} = -R_r \psi_{rd} - z_p \omega \psi_{rq} + R_r L_m i_{sd} \quad (3)$$

$$10 \quad \frac{d\psi_{rq}}{dt} = -R_r \psi_{rq} + z_p \omega \psi_{rd} + R_r L_m i_{sq} \quad (4)$$

$$T_e = z_p \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (5)$$

15 or

$$V_s = Z_s(s) I_s \quad (6)$$

20

$$\omega = \omega_s - s \omega_s \quad (7)$$

$$25 \quad I_r = \frac{V_s}{Z_r(s)} \quad (8)$$

$$30 \quad T_e = \frac{3R_r I_r^2}{s} \quad (9)$$

35 or

$$L_s \frac{di_{sd}}{dt} = -R_s i_{sd} + z_p \omega L_s \psi_{rq} + v_{sd} \quad (10)$$

40

$$L_s \frac{di_{sq}}{dt} = -R_s i_{sq} - z_p \omega L_s \psi_{rd} + v_{sq} \quad (11)$$

$$45 \quad \frac{d\psi_{rd}}{dt} = -z_p \omega \psi_{rq} \quad (12)$$

$$50 \quad \frac{d\psi_{rq}}{dt} = z_p \omega \psi_{rd} \quad (13)$$

$$55 \quad T_e = z_p \frac{3}{2} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (14)$$

in which is
 i_{sd} the motor current in direction d

- i_{sq} the motor current in direction q
 ψ_{rd} the magnetic flux of the rotor in the d-direction
 ψ_{rq} the magnetic flux of the rotor in the q-direction
 T_e the motor moment
5 v_{sd} the supply voltage of the motor in the d-direction
 v_{sq} the supply voltage of the motor in the q-direction
 ω the angular speed of the rotor and impeller
 R'_s the equivalent resistance of the stator winding
 R'_r the equivalent resistance of the rotor winding
10 L_m the inductive coupling resistance between the stator and the rotor winding
 L'_s the inductive equivalent resistance of the stator winding
 L_r the inductive resistance of the rotor winding
 Z_p the pole pair number
 I_s the phase current
15 V_s the phase voltage
 ω_s the frequency of the supply voltage
 ω the actual rotor and impeller rotational speed
 s the motor slip
 $Z_s(s)$ the stator impedance
20 $Z_r(s)$ the rotor impedance
 R_r the equivalent resistance of the rotor winding
 R_s the equivalent resistance of the stator winding
 L_s the inductive resistance of the stator winding
25 wherein d and q are two directions perpendicular to the motor shaft and perpendicular to one another
and that the mechanical-hydraulic pump/motor model is formed by the equation

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - B\omega - T_p \quad (15)$$

30 and at least one of the equations

$$H_p = -a_{h2}Q^2 + a_{h1}Q\omega + a_{h0}\omega^2 \quad (16)$$

$$T_p = -a_{t2}Q^2 + a_{t1}Q\omega + a_{t0}\omega^2 \quad (17)$$

40 in which is

$\frac{d\omega}{dt}$ the temporal derivative of the angular speed of the rotor,

T_p the pump torque,

45 J the moment of mass inertia of the rotor, impeller and the delivery fluid contained in the impeller,

B the friction constant,

Q the delivery flow of the pump,

H_p the differential pressure produced by the pump,

50 a_{h2}, a_{h1}, a_{h0} the parameters which describe the relationship between the rotational speed of the impeller, the delivery flow and the differential pressure and

a_{t2}, a_{t1}, a_{t0} the parameters which describe the relation between the rotational speed of the impeller, the delivery flow and the moment of mass inertia.

- 55 4. A method according to claim 3, **characterised in that** the variables $a_{h0}-a_{h2}$ and $a_{t0}-a_{t2}$ are fixed in the equations (16) and (17), as well as the variables B and J in the equation (15), that a motor moment (T_e) is determined from the electrical motor model (1) according to the equations (1) - (5) or (6) - (9) or (10) - (14), and the rotational speed is computed according to the equations (1) - (5) or (6) - (9) or (10) - (14), whereupon with the help of the equations

(16) and (17), one determines a relationship between differential pressure and delivery flow on the one hand and between the pump moment and delivery flow on the other hand.

5. A method according to claim 3, **characterised in that** a tolerance band is fixed by way of variance of at least one of the variables a_{h0} - a_{h2} and a_{t0} - a_{t2} and B and J.
6. A method according to one of the preceding claims, **characterised in that** the determined values are substituted into the equations according to claim 4, in a manner such that several fault variables (r_1 - r_4) result, wherein by way of the combination of fault variables, the type of fault is determined by way of predefined boundary value combinations.
- 10
7. A method according to one of the preceding claims, **characterised in that** the determined values or values derived therefrom are compared to predefined values, wherein the predefined values in each case define a surface, wherein one determines whether the determined variables or those derived therefrom lie on one of these surfaces ($r_1^* - r_4^*$) or not, and by way of the combination of the fault variables, one determines the type of fault by way of predefined boundary value combinations.
- 15
8. A method according to one of the preceding claims, **characterised in that** the evaluation of the fault type is effected by way of the following table:

fault type	fault variable	r_1	r_2	r_3	r_4
		r_1^*	r_2^*	r_3^*	r_4^*
increased friction on account of mechanical defects		1	0	1	1
reduced delivery/ absent differential pressure		0	1	1	1
defect in suction region/ absent delivery flow		1	1	0	1
delivery stoppage		1	1	1	1

- 30
9. A method according to one of the preceding claims, **characterised in that** on determining a fault, the pump assembly is activated with a changed rotational speed, in order by way of the measurement results which then set in, to more accurately specify the determined fault.

- 35
10. A method according to one of the preceding claims, **characterised in that** the variables r_1 - r_4 are defined by the equations

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\hat{\omega}_1}{dt} = -B\hat{\omega}_1 - \left(-a_{t2}Q^2 + a_{t1}Q\omega + a_{t0}\omega^2 \right) + T_e + k_e(\omega - \hat{\omega}_1) \\ r_1 = q_1(\omega - \hat{\omega}_1) \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r_2 = q_2 \left(-a_{h2}Q^2 + a_{h1}\omega Q + a_{h0}\omega^2 - H_p \right) \end{array} \right. \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q' = \frac{a_{h1}\omega + \sqrt{a_{h1}^2\omega^2 - 4a_{h2}(H_p + a_{h0}\omega^2)}}{2a_{h2}} \\ J \frac{d\hat{\omega}_3}{dt} = -B\hat{\omega}_3 - \left(-a_{t2}Q'^2 + a_{t1}Q'\omega + a_{t0}\omega^2 \right) + T_e + k_3(\omega - \hat{\omega}_3) \\ r_3 = q_3(\omega - \hat{\omega}_3) \end{array} \right. \quad (21)$$

$$\begin{cases}
 \omega' = \frac{-a_{h1}H_p + \sqrt{a_{h1}^2H_p^2 - 4a_{h2}(H_p + a_{h0}Q^2)}}{2a_{h2}} \\
 J \frac{d\hat{\omega}_4}{dt} = -B\hat{\omega}_4 - (-a_{t2}Q^2 + a_{t1}Q\omega' + a_{t0}\omega'^2) + T_e + k_4(\omega' - \hat{\omega}_4) \\
 r_4 = q_4(\omega' - \hat{\omega}_4)
 \end{cases} \quad (22)$$

10 in which represent
 k_1, k_3, k_4 constants,
 q_1, q_2, q_3, q_4 constants,
 Q' the computed delivery flow on the basis of current rotational speed and measured differential pressure,
 $\hat{\omega}_1$ the computed rotor rotational speed on the basis of the mechanical-hydraulic equations (15) and (17),
 15 $\hat{\omega}_3$ the computed rotor rotational speed on the basis of the equations (15), (16) and (17),
 $\hat{\omega}_4$ the computed rotor rotational speed on the basis of the equations (15), (16) and (17),
 ω' the computed rotor rotational speed on the basis of the measured differential pressure and measured delivery flow
 $r_1 - r_4$ fault variables, and
 20 $r_1^* - r_4^*$ surfaces determined by three variables, which represent a fault-free operation of the pump.

Revendications

1. Procédé pour la détermination d'erreurs dans le fonctionnement d'un groupe moto-pompe, selon lequel au moins 25 deux grandeurs électriques du moteur, fixant la puissance électrique du moteur, et au moins une grandeur hydraulique variable de la pompe ainsi qu'au moins une grandeur hydraulique supplémentaire fixant la puissance de la pompe sont détectées et, d'une part, les deux grandeurs électriques du moteur, fixant la puissance électrique du moteur, sont combinées mathématiquement, en vue de l'obtention d'au moins une valeur de comparaison et, d'autre part, la au moins une grandeur hydraulique variable de la pompe ainsi que la au moins une grandeur hydraulique supplémentaire, fixant la puissance de la pompe, sont combinées mathématiquement en vue de l'obtention d'au moins une valeur de comparaison, étant précisé que pour la combinaison mathématique, on emploie un modèle mathématique de moteur électrique (1) en liaison avec un modèle mathématique de pompe mécanique-hydraulique (3) et qu'à partir des résultats des combinaisons mathématiques, il est déterminé, par comparaison avec des valeurs pré-établies, si une erreur est présente ou non, la tension d'entrée V_{abc} et le courant moteur i_{abc} étant utilisés comme 30 valeurs d'entrée pour le modèle de moteur (1) pour déterminer le couple T_e agissant sur l'arbre moteur, **caractérisé** 35 **en ce que** la vitesse de rotation de l'arbre ω est déterminée à partir du modèle de moteur et ces valeurs dérivées du modèle de moteur (1) ainsi que les grandeurs déterminées par capteurs de la hauteur de refoulement H (pression différentielle) ainsi que du débit de refoulement Q sont combinées mathématiquement dans le modèle de pompe mécanique-hydraulique (3).
 40
2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que**, lorsque la présence d'une erreur est déterminée, il est encore déterminé de quelle erreur il s'agit.
3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le modèle de moteur électrique (1) 45 est formé par les équations suivantes :

$$L'_s \frac{di_{sd}}{dt} = -R'_s i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} (R'_r \psi_{rd} + z_p \omega \psi_{rq}) + v_{sd} \quad (1)$$

$$L'_s \frac{di_{sq}}{dt} = -R'_s i_{sq} + \frac{L_m}{L_r} (R'_r \psi_{rq} - z_p \omega \psi_{rd}) + v_{sq} \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = -R'_r \psi_{rd} - z_p \omega \psi_{rq} + R'_r L_m i_{sd} \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = -R'_r \psi_{rq} + z_p \omega \psi_{rd} + R'_r L_m i_{sq} \quad (4)$$

$$5 \quad T_e = z_p \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (5)$$

OU

$$10 \quad V_s = Z_s(s) I_s \quad (6)$$

$$15 \quad \omega = \omega_s - s \omega_s \quad (7)$$

$$20 \quad I_r = \frac{V_s}{Z_r(s)} \quad (8)$$

$$25 \quad T_e = \frac{3R_r I_r^2}{s} \quad (9)$$

OU

$$30 \quad L_s \frac{di_{sd}}{dt} = -R_s i_{sd} + z_p \omega L_s \psi_{rq} + v_{sd} \quad (10)$$

$$35 \quad L_s \frac{di_{sq}}{dt} = -R_s i_{sq} - z_p \omega L_s \psi_{rd} + v_{sq} \quad (11)$$

$$40 \quad \frac{d\psi_{rd}}{dt} = -z_p \omega \psi_{rq} \quad (12)$$

$$45 \quad \frac{d\psi_{rq}}{dt} = z_p \omega \psi_{rd} \quad (13)$$

$$45 \quad T_e = z_p \frac{3}{2} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (14)$$

dans lesquelles

i_{sd} est le courant du moteur dans la direction d

i_{sq} est le courant du moteur dans la direction q

ψ_{rd} est le flux magnétique du rotor dans la direction d

ψ_{rq} est le flux magnétique du rotor dans la direction q

T_e est le couple du moteur

V_{sd} est la tension d'alimentation du moteur dans la direction d

V_{sq} est la tension d'alimentation du moteur dans la direction q

ω est la vitesse angulaire du rotor et de la roue à aubes

R'_s est la résistance équivalente de l'enroulement du stator

R'_r est la résistance équivalente de l'enroulement du rotor

L_m est la résistance de couplage inductive entre l'enroulement du stator et l'enroulement du rotor

5 L'_s est la résistance équivalente inductive de l'enroulement du stator

L_r est la résistance inductive de l'enroulement du rotor

Z_p est le nombre de paires de pôles

I_s est le courant de phase

5 V_s est la tension de phase

ω_s est la fréquence de la tension d'alimentation

ω est la vitesse de rotation réelle du rotor et de la roue à aubes

s est le glissement du moteur

10 $Z_s(s)$ est l'impédance du stator

$Z_r(s)$ est l'impédance du rotor

R_r est la résistance équivalente de l'enroulement du rotor

R_s est la résistance équivalente de l'enroulement du stator

L_s est la résistance inductive de l'enroulement du stator,

15 d et q étant deux directions perpendiculaires l'une à l'autre perpendiculairement à l'arbre du moteur,

et **en ce que** le modèle de pompe/moteur mécanique-hydraulique est formé par une équation

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - B\omega - T_p \quad (15)$$

20 et au moins l'une des équations

$$H_p = -a_{h2}Q^2 + a_{h1}Q\omega + a_{h0}\omega^2 \quad (16)$$

$$T_p = -a_{t2}Q^2 + a_{t1}Q\omega + a_{t0}\omega^2 \quad (17)$$

30 dans lesquelles

$\frac{d\omega}{dt}$ est la dérivée dans le temps de la vitesse angulaire du rotor

T_p est le couple de rotation de la pompe

J est le moment d'inertie du rotor, de la roue à aubes et du liquide transporté pris dans la route à aubes

35 B est la constante de frottement

Q est le débit de refoulement de la pompe

H_p est la pression différentielle engendrée par la pompe

a_{h2}, a_{h1}, a_{h0} sont les paramètres qui dépeignent la relation entre la vitesse de rotation de la roue à aubes, le débit de refoulement et la pression différentielle, et

40 a_{t2}, a_{t1}, a_{t0} sont les paramètres qui dépeignent la relation entre la vitesse de rotation de la roue à aubes, le débit de refoulement et le moment d'inertie.

4. Procédé selon la revendication 3, **caractérisé en ce que**, dans les équations (16) et (17), les grandeurs a_{h0} - a_{h2} et a_{t0} - a_{t2} sont établies, ainsi que dans l'équation (15) les grandeurs B et J , **en ce qu'à** partir du modèle de moteur électrique (1) conforme aux équations (1) - (5) ou (6) - (9) ou (10) - (14), un couple de moteur (T_e) est déterminé et la vitesse de rotation est calculée d'après les équations (1) - (5) ou (6) - (9) ou (10) - (14), après quoi, à l'aide des équations (16) et (17), une relation entre la pression différentielle et le débit de refoulement, d'une part, et entre le couple de pompe et le débit de refoulement d'autre part, est déterminée.

5. Procédé selon la revendication 3, **caractérisé en ce qu'** une bande de tolérance est établie par variance d'au moins l'une des grandeurs a_{h0} - a_{h2} et a_{t0} - a_{t2} et B et J .

6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les valeurs déterminées sont portées dans les équations selon la revendication 4, de telle manière que plusieurs grandeurs d'erreur (r_1 - r_4) en résultent, étant précisé qu'à partir de la combinaison des grandeurs d'erreur la nature de l'erreur est déterminée sur la base de combinaisons de valeurs limites pré-établies.

- 5
7. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les valeurs déterminées ou des valeurs dérivées de celles-ci sont comparées à des valeurs pré-établies, les valeurs pré-établies définissant chacune une surface, étant précisé qu'il est déterminé si les grandeurs déterminées ou les grandeurs dérivées de celles-ci sont situées ou non sur l'une de ces surfaces ($r_1^* - r_4^*$), et que sur la base de la combinaison des grandeurs d'erreur, la nature de l'erreur est déterminée à partir de combinaisons pré-établies de valeurs limites.
 8. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la détermination de la nature de l'erreur s'effectue à partir du tableau suivant :

10

Nature de l'erreur	Grandeur d'erreur	r_1 ,	r_2 ,	r_3 ,	r_4 ,
		r_1^*	r_2^*	r_3^*	r_4^*
Frottement accru dû à des défauts mécaniques		1	0	1	1
Refoulement réduit/ pression différentielle insuffisante		0	1	1	1
Défaut dans la zone d'aspiration/ débit de refoulement insuffisant		1	1	0	1
Arrêt du refoulement		1	1	1	1

20

9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que**, lors de la détermination d'une erreur, le groupe moto-pompe est excité dans le sens d'une vitesse de rotation modifiée, pour à partir des résultats de mesure ou se présentant alors, spécifier avec plus de précision l'erreur déterminée.
- 25 10. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les grandeurs $r_1 - r_4$ sont définies par les équations :

30

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\hat{\omega}_1}{dt} = -B\hat{\omega}_1 - \left(-a_{t2}Q^2 + a_{t1}Q\omega + a_{t0}\omega^2 \right) + T_e + k_e(\omega - \hat{\omega}_1) \\ r_1 = q_1(\omega - \hat{\omega}_1) \end{array} \right. \quad (19)$$

35

$$\left\{ \begin{array}{l} r_2 = q_2 \left(-a_{h2}Q^2 + a_{h1}\omega Q + a_{h0}\omega^2 - H_p \right) \end{array} \right. \quad (20)$$

40

$$\left\{ \begin{array}{l} Q' = \frac{a_{h1}\omega + \sqrt{a_{h1}^2\omega^2 - 4a_{h2}(H_p + a_{h0}\omega^2)}}{2a_{h2}} \\ J \frac{d\hat{\omega}_3}{dt} = -B\hat{\omega}_3 - \left(-a_{t2}Q'^2 + a_{t1}Q'\omega + a_{t0}\omega^2 \right) + T_e + k_3(\omega - \hat{\omega}_3) \\ r_3 = q_3(\omega - \hat{\omega}_3) \end{array} \right. \quad (21)$$

45

50

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega' = \frac{-a_{h1}H_p + \sqrt{a_{h1}^2H_p^2 - 4a_{h2}(H_p + a_{h0}Q^2)}}{2a_{h2}} \\ J \frac{d\hat{\omega}_4}{dt} = -B\hat{\omega}_4 - \left(-a_{t2}Q^2 + a_{t1}Q\omega' + a_{t0}\omega'^2 \right) + T_e + k_4(\omega' - \hat{\omega}_4) \\ r_4 = q_4(\omega' - \hat{\omega}_4) \end{array} \right. \quad (22)$$

55 dans lesquelles
 k_1, k_2, k_3 sont des constantes,
 q_1, q_2, q_3, q_4 sont des constantes,
 Q' est le débit de refoulement calculé sur la base de la vitesse de rotation instantanée et de la pression différentielle

mesurée,

$\hat{\omega}_1$ est la vitesse de rotation calculée du rotor sur la base des équations mécaniques-hydrauliques (15) et (17),

$\hat{\omega}_3$ est la vitesse de rotation calculée du rotor sur la base des équations (15), (16) et (17),

$\hat{\omega}_4$ est la vitesse de rotation calculée du rotor sur la base des équations (15), (16) et (17),

5 ω' est la vitesse de rotation calculée du rotor sur la base de la pression différentielle et du débit de refoulement mesuré,

$r_1 - r_4$ sont des grandeurs d'erreur, et

10 $r_1^* - r_4^*$ sont des surfaces définies par trois variables, qui représentent un fonctionnement exempt d'erreurs de la pompe.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

Fig. 1

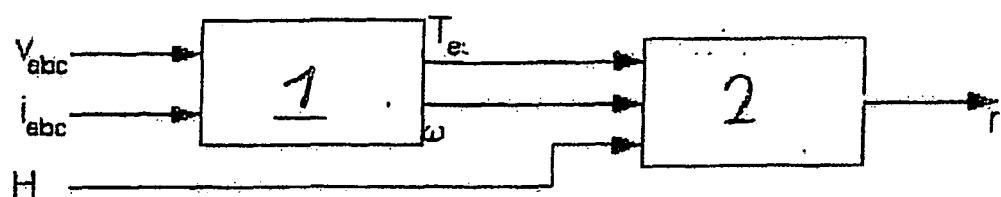


Fig. 2

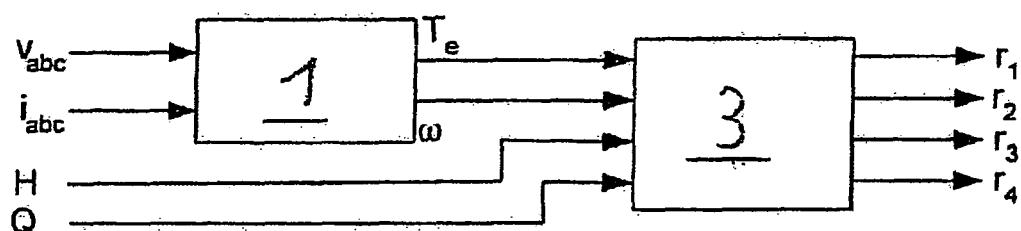


Fig. 3

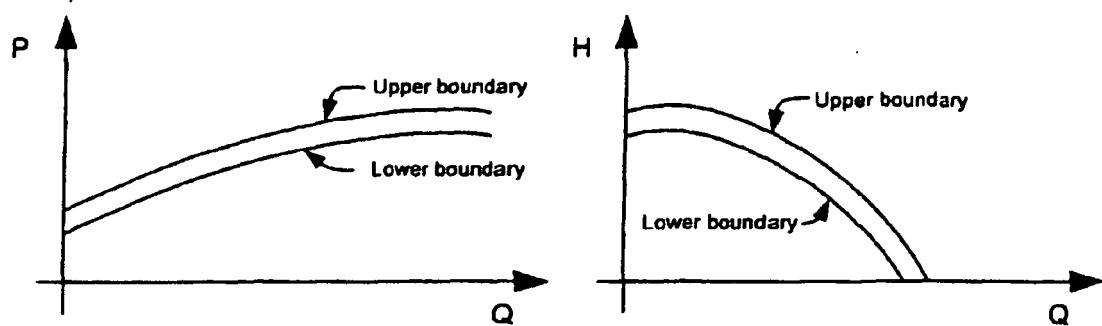


Fig. 4

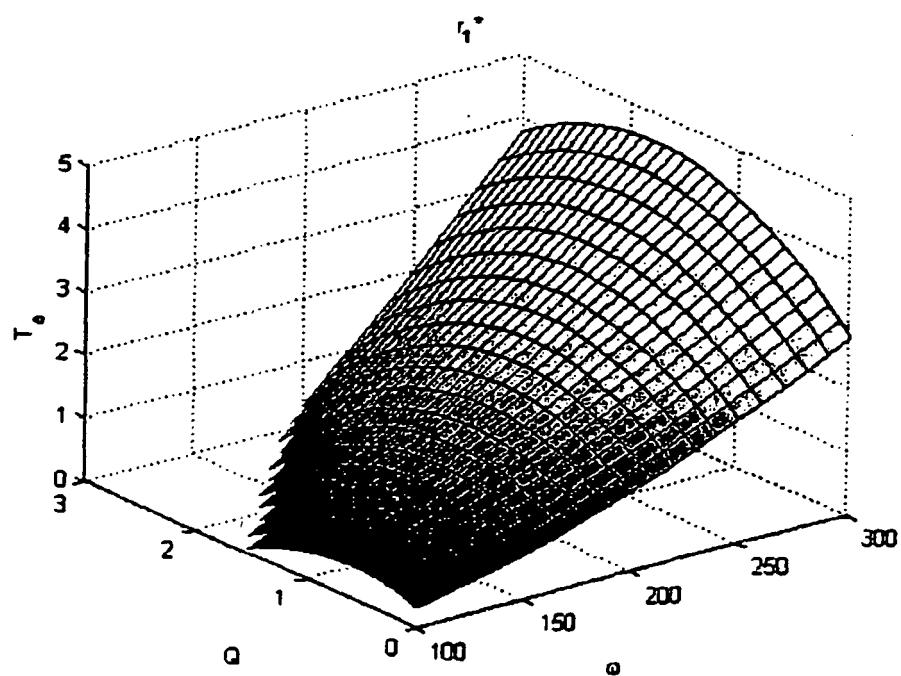


Fig. 5

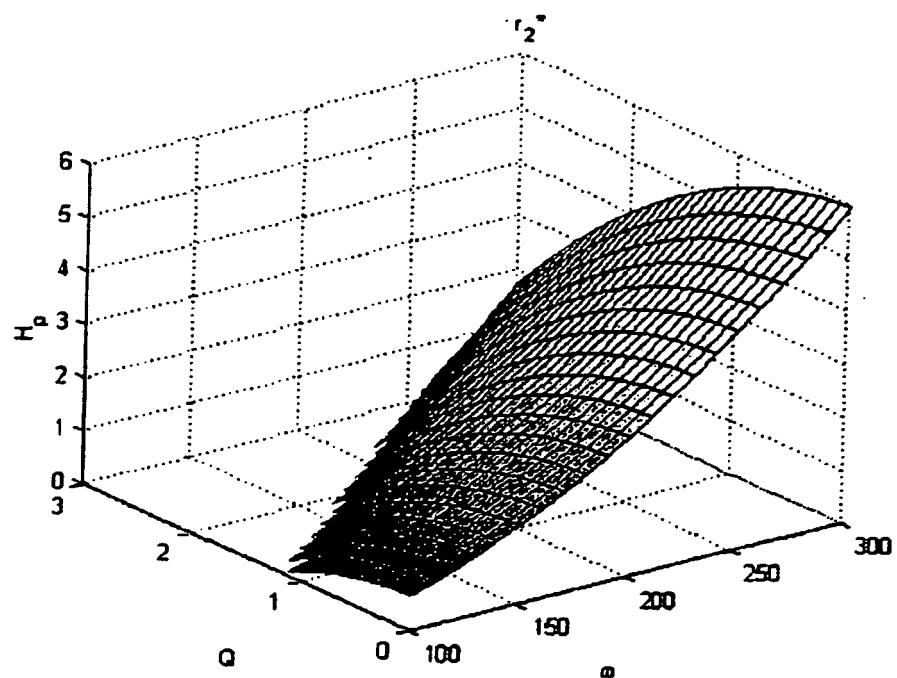


Fig. 6

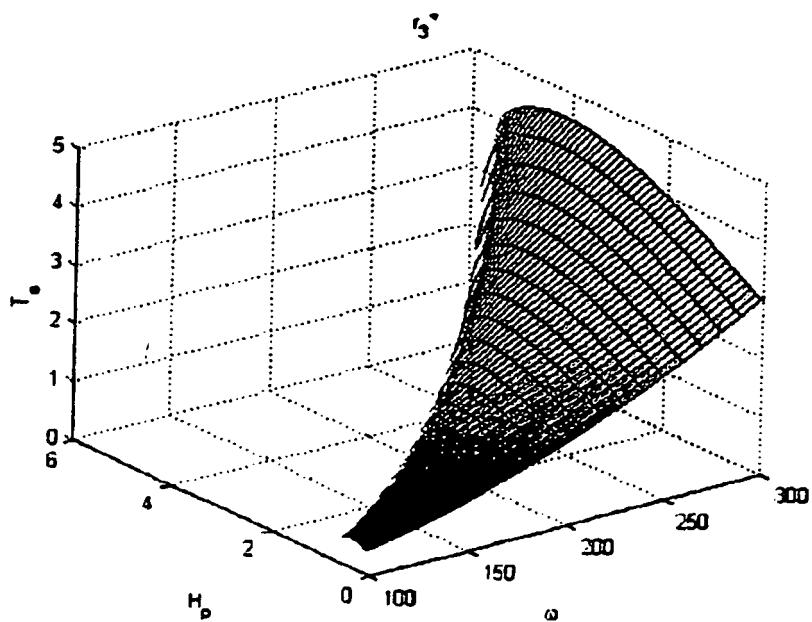
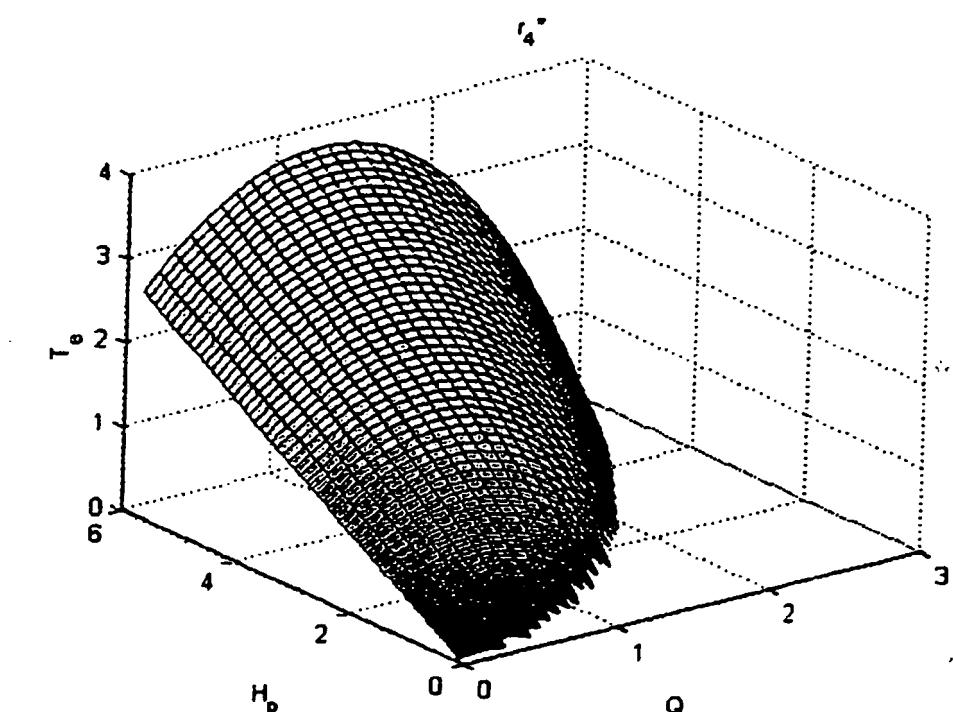


Fig. 7



IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 1286056 A **[0002]**
- EP 0321295 A **[0003]**

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **WOLFRAM ; ARMIN ; DOMINIK FÜSSEL ; TORSTEN BRUNE ; ROLF ISERMANN.** Component-based multi-model approach for fault detection and diagnosis of a centrifugal pump, Institute of Autom. Control, Darmstadt University of Technology. *American Control Conference, 2001: Proceedings of the 2001*, 2001, vol. 6, ISBN 078036495-3, 4443-4448 **[0004]**
- **TU DARMSTADT.** VDI Forfschrittsberichte. VDI Verlag, 2002 **[0005]**