

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 51076/2016
(22) Anmeldetag: 28.11.2016
(43) Veröffentlicht am: 15.04.2018

(51) Int. Cl.: **G01M 15/00** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
AT 508909 B1
JAKUBEK STEFAN, FLECK ANDREAS:
Schätzung des inneren Drehmoments von
Verbrennungsmotoren durch parameterbasierte
Kalmanfilterung. Automatisierungstechnik 57 (8),
S. 395-402, 01. August 2009 (01.08.2009), DOI:
10.1524/auto.2009.0786
JP 2006300684 A

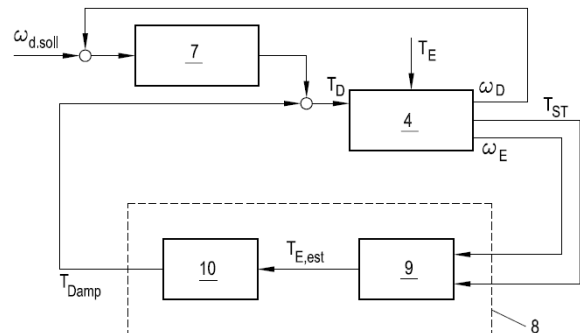
(71) Patentanmelder:
AVL List GmbH
8020 Graz (AT)

(72) Erfinder:
Kokal Helmut Dipl.Ing. Dr.
8020 Graz (AT)

(74) Vertreter:
Patentanwälte Pinter & Weiss OG
Wien

(54) **Verfahren und Vorrichtung zur Regelung einer Prüfstandsanordnung**

(57) Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Regelung einer Prüfstandsanordnung (4) mit einem Prüfling (1) und mit einer Belastungsmaschine (2), die durch eine Verbindungswelle (3) mit dem Prüfling (1) verbunden ist. Es wird ein Schätzwert ($T_{E,est}$) für das innere Drehmoment (T_E) des Prüflings (1) ermittelt, und aus dem Schätzwert ($T_{E,est}$) wird unter Berücksichtigung einer zu dämpfenden Eigenfrequenz (f_0) und einer Verzögerung (Delay) ein Bedämpfungssignal (T_{Damp}) ermittelt und im Regelkreis rückgeführt.



Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Regelung einer Prüfstandsordnung (4) mit einem Prüfling (1) und mit einer Belastungsmaschine (2), die durch eine Verbindungswelle (3) mit dem Prüfling (1) verbunden ist. Es wird ein Schätzwert ($T_{E,est}$) für das innere Drehmoment (T_E) des Prüflings (1) ermittelt und aus dem Schätzwert ($T_{E,est}$) wird unter Berücksichtigung einer zu dämpfenden Eigenfrequenz (f_0) und einer Verzögerung (Delay) ein Bedämpfungssignal (T_{Damp}) ermittelt und im Regelkreis rückgeführt.

Fig. 3

Verfahren und Vorrichtung zur Regelung einer Prüfstandsanordnung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Regelung einer Prüfstandsanordnung mit einem Prüfling und mit einer Belastungsmaschine, die durch eine Verbindungswelle mit dem Prüfling verbunden ist.

Bei Motorenprüfständen in überkritischer Anordnung kommt es häufig zur Anregung der Prüfstandseigenfrequenz durch noch nicht gut abgestimmte Verbrennungsprozesse in den einzelnen Zylindern eines Verbrennungsmotors (speziell bei Motoren, die noch in einem Entwicklungsstadium sind). Dies kann sich dann beispielsweise durch auftreten der 0,5-ten Ordnung im Momentenverlauf äußern, welche dann die Prüfstandseigenfrequenz anregen kann. Diese Resonanz hat als Konsequenz einen unnatürlichen Drehzahlverlauf des Verbrennungsmotors. Solche Effekte erschweren eine saubere Kalibrierung am Verbrennungsmotor bzw. kann sich eine Kalibrierung als unmöglich erweisen, beispielsweise bei einer Zündaussetzererkennung.

Dabei besteht unter anderem das Problem, dass die derart verursachten Störungen nicht direkt messbar und somit einer Regelung entzogen sind.

Es ist das Ziel der gegenständlichen Erfindung, Verfahren und Vorrichtungen zur Prüfstandsregelung vorzusehen, mit denen derartige Effekte stark reduziert werden können.

WO2011/022746 beschreibt ein Regelungsverfahren für eine Prüfstandsanordnung, wobei zur Erhöhung der Regelgüte anhand einer Auswertung des Drehwinkels das innere Drehmoment des Verbrennungsmotors ermittelt und mithilfe eines Repetitive-Control-Verfahrens im Regelkreis rückgeführt wird. Eine Bedämpfung von Eigenfrequenzen der Prüfstandsanordnung sieht die Offenbarung der WO2011/022746 nicht vor.

In realen Prüfstandsumgebungen ist es oftmals nicht möglich, bestimmte Messgrößen, wie etwa den Drehwinkel, mit einer ausreichenden Genauigkeit zu messen. Entweder gibt es im Stand der Technik keine dazu erforderliche Sensoren oder der hohe Aufwand, den die Installation und die Verwendung bekannter Sensoren mit sich bringen würde, verunmöglicht einen Einsatz. Es ist daher ein Ziel der gegenständlichen Anmeldung, eine Bedämpfung von Eigenschwingungen mithilfe der im Prüfstand üblicherweise vorhandenen Sensorik zu ermöglichen.

Erfindungsgemäß werden die Ziele der gegenständlichen Anmeldung durch ein Verfahren der eingangs genannten Art gelöst, bei dem ein Schätzwert für das innere Drehmoment des Prüflings ermittelt wird, wobei aus dem Schätzwert unter Berücksichtigung einer zu dämpfenden Eigenfrequenz und einer Verzögerung ein Bedämpfungssignal ermittelt und im Regelkreis rückgeführt wird. Das rückgeführte Bedämpfungssignal kann gegebenenfalls mithilfe

einer vorzugsweise einstellbaren Verstärkung auf eine vorteilhafte Signalstärke eingestellt werden. Somit können vom Prüfling kommende und an sich nicht messbare Störungen geschätzt und für die Bedämpfung berücksichtigt werden. Dabei wird die eigentliche Störgröße (im Fall eines Verbrennungsmotorprüfstands ist das das innere Verbrennungsmoment) in Form eines Schätzwerts als Eingang in die Regelung verwendet. Bei vergleichbaren Vorrichtungen war es bisher bekannt, eine gemessene Größe (z.B. ein Messflanschdrehmoment, eine Prüflingsdrehzahl, eine Belastungseinheits-Drehzahl, etc.) als Reglereingang zu verwenden. Oftmals enthalten diese Messgrößen jedoch bereits die Auswirkungen der von der Störung angeregten Eigenfrequenz und sind als Reglereingang nicht gut geeignet.

In vorteilhafter Weise kann der Schätzwert aus der Prüflingswinkelgeschwindigkeit und dem Wellenmoment ermittelt werden. Dies erleichtert die Ermittlung der Eingangswerte, da die üblicherweise im Prüfstand vorhandenen Sensoren verwendet werden können.

In einer vorteilhaften Ausführungsform kann bei der Ermittlung des Bedämpfungssignals aus dem Schätzwert ein die zu dämpfende Eigenfrequenz umfassender Bandbereich herausgefiltert und das herausgefilterte Signal um eine Verzögerung verzögert und um eine Verstärkung verstärkt werden. Somit kann aufgrund der Periodizität der Störung eine phasenrichtige Aufschaltung der Dämpfungsenergie auf die Belastungseinheit rückgeführt werden.

In vorteilhafter Weise können die Parameter für die Verzögerung und/oder die Verstärkung und/oder den Bandbereich in einer Simulation vorab bestimmt werden. Dies verkürzt die für den Prüflauf erforderliche Prüfstandzeit und verhindert eine zeitraubende Parametrisierung durch Versuch und Irrtum.

In einer bevorzugten Ausführungsform kann die Verzögerung ein konstanter Parameter sein. Dies erlaubt eine besonders einfache Implementierung, etwa unter Verwendung eines mit einer konstanten Verzögerung parametrisierten FIFO-Speichers. Die Phasenvordrehung der Störgröße erfolgt dabei unter Ausnutzung von Periodizität der Störgröße und konstanter Eigenfrequenz der Prüfstandsanordnung. Die Verzögerung kann dabei optimal an die Systemperformance des Regelkreises angepasst werden.

Zur vorteilhaften Umsetzung des obigen Verfahrens weist die eingangs genannte Vorrichtung erfindungsgemäß eine Bedämpfungseinheit mit einer Schätzeinheit und einem Filter auf, wobei die Schätzeinheit einen Schätzwert für das innere Drehmoment des Prüflings erstellt und wobei der Filter aus dem Schätzwert auf Basis einer zu dämpfenden Eigenfrequenz und einer Verzögerung ein Bedämpfungssignal erstellt und im Regelkreis rückführt.

In vorteilhafter Weise kann die Schätzeinheit den Schätzwert aus der Prüflingswinkelgeschwindigkeit und dem Wellenmoment ermitteln. Dies erlaubt die Erstellung eines Schätzwerts ohne zusätzliche Sensorik.

In einer bevorzugten Ausführungsform kann die Schätzeinheit einen Kalman-Filter aufweisen, was eine einfache und schnelle Erzeugung des Schätzwerts erlaubt.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform kann der Filter ein als FIFO-Speicher ausgebildetes Verzögerungsglied aufweisen. Dies erleichtert die Parametrisierung und erlaubt die Verwendung eines konstanten Parameters für die Verzögerung. Aufgrund der Periodizität der Störung kann eine Kompensation der Systemverzögerung der Regelstrecke in die Stellgröße rückgeführt werden.

In vorteilhafter Weise entspricht die Prüfstandsordnung einer überkritischen Anordnung.

Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 4 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung zeigen. Dabei zeigt

Fig.1 eine schematische Darstellung einer Prüfstandsordnung,

Fig. 2 eine schematische Darstellung eines mathematischen Modells eines Zweimassenschwingers,

Fig. 3 ein Blockschaltbild einer beispielhaften Reglerstruktur gemäß der Erfindung und

Fig. 4 ein Blockschaltbild einer aktiven Bedämpfung gemäß der Erfindung.

Fig. 1 zeigt in einer schematisierten Darstellung die wesentlichen Komponenten in einem Prüfstand. Ein Prüfling 1, beispielsweise ein Verbrennungsmotor, ist über eine Verbindungswelle 3 mit einer Belastungsmaschine 2 verbunden, die gemäß eines Prüflaufs den Prüfling mit einem Lastmoment beaufschlagt. Die Einheit aus Prüfling 1, Belastungsmaschine 2 und Verbindungswelle 3 wird im Zusammenhang mit der gegenständlichen Beschreibung auch als Prüfstandsordnung 4 bezeichnet.

Ein Automatisierungssystem 5 ermittelt Steuergrößen und gibt dieser der Prüfstandsordnung 4 vor, beispielsweise eine Steuergröße für das Belastungsmaschinen-Drehmoment T_D der Belastungsmaschine 2 und eine Steuergröße für die Pedalstellung α des Prüflings 1. Die Steuergrößen werden von einer Stelleinrichtung 6 der Belastungsmaschine 2 bzw. einer Stelleinrichtung 6' des Prüflings 2 in die entsprechenden Stellgrößen umgewandelt.

Die Ist-Werte der Regelgrößen werden von dem Automatisierungssystem 5 über entsprechende Sensoren ermittelt, beispielsweise die in Fig. 1 dargestellten Ist-Werte für die Prüflingwinkelgeschwindigkeit ω_E , die Belastungsmaschinen-Winkel-Geschwindigkeit ω_D , und das Wellendrehmoment T_{ST} .

Das Schwingungsverhalten der Prüfstandsordnung 4 kann mathematisch als Zweimassenschwinger modelliert werden, wie er in Fig. 2 dargestellt ist. Neben den oben definierten Werten für das Wellendrehmoment T_{ST} , das Belastungsmaschinen-Drehmoment T_D , das

Prüflings-Drehmoment T_E , die Belastungsmaschinen-Winkelgeschwindigkeit ω_D und die Prüflingswinkelgeschwindigkeit ω_E beinhaltet das Modell noch die Wellensteifigkeit c , die Wellendämpfung d , das Prüflings-Trägheitsmoment θ_E und das Belastungsmaschinen-Trägheitsmoment θ_D , anhand derer Eigenfrequenzen des Systems und die Dämpfung mathematische ermittelt werden.

Für eine Prüfstandsordnung 4 lässt sich üblicherweise durch die Modellierung als Zweimassenschwinger eine eindeutige Eigenfrequenz f_0 ermitteln. Die Dimensionierung der Verbindungswelle 3 wird üblicher Weise so gewählt, dass diese Eigenfrequenz unter der Zündfrequenz des Arbeitsbereiches eines Prüflings 1 zu liegen kommt. Die Eigenfrequenz liegt dabei im Bereich zwischen der Geschwindigkeit des Starters und der Leerlaufgeschwindigkeit des Prüflings und wird somit vom Prüfstand 4 nur kurz beim Starten des Prüflings 1 durchlaufen. Solch eine Anordnung wird als „überkritische Anordnung“ bezeichnet.

Als Beispiel kann etwa ein 4-Zylinder Motor mit einem Arbeitsbereich von 600 bis 6000 rpm betrachtet werden. Bei 600 rpm ergibt sich eine Zündfrequenz von 20Hz. Für eine überkritische Anordnung wird die Wellenverbindung daher so dimensioniert, dass sich für die Prüfstandsordnung eine Eigenfrequenz von beispielsweise 15 Hz ergibt.

Im praktischen Einsatz, insbesondere bei Prüfläufen mit noch nicht getesteten Prototypen, können sich jedoch auch Störungen unterhalb der Zündfrequenz ergeben, die auch die Eigenfrequenz anregen können. Die Eigenfrequenz könnte zum Beispiel durch eine 0,5-te Ordnung (der Drehfrequenz) einer vom Prüfling generierten Störung angeregt werden.

Um solche Effekte stark zu reduzieren offenbart diese Beschreibung erfindungsgemäß eine aktive Dämpfung, die im Folgenden unter Bezugnahme auf Fig. 3 beschrieben wird, wobei in Fig. 3 ein Teil der Reglerstruktur für die Belastungsmaschine schematisch dargestellt ist.

Als Eingang eines Geschwindigkeitsreglers 7 wird eine Regelabweichung als Differenz eines Sollwerts der Belastungsmaschinen-Winkelgeschwindigkeit $\omega_{D,Soll}$ und des Istwerts der Belastungsmaschinen-Winkelgeschwindigkeit ω_D gebildet. Der Geschwindigkeitsregler 7 erstellt auf Basis der Regelabweichung eine Steuergröße für das Belastungsmaschinen-Drehmoment T_D , welche an die Prüfstandsordnung 4 (bzw. an deren in Fig. 1 dargestellte Stelleinrichtung 6) übermittelt wird. Dabei wird die Steuergröße mit einem Bedämpfungssignal T_{Damp} korrigiert, das von einer Bedämpfungseinheit 8 auf Basis des Wellendrehmoment T_{ST} und der Prüflingswinkelgeschwindigkeit ω_E ermittelt wird.

Die Bedämpfungseinheit 8 weist dazu eine Schätzeinheit 9 auf, die einen Schätzwert $T_{E,est}$ für ein inneres Drehmoment T_E des Prüflings 1 ermittelt. Das innere Drehmoment T_E des Prüflings ist am Prüfstand nicht direkt messbar und kann somit als nicht messbare Störgröße des Regelkreises betrachtet werden. Diese Größe ist aber eine essentielle Größe als Rege-

lungseingangsgröße für die aktive Dämpfung, da sie die Anregung für das Zweimassenschwinger-System enthält.

Um den Schätzwert $T_{E,est}$ für das innere Drehmoment T_E zu erstellen, kann die Schätzeinheit 9 einen Kalman-Filter aufweisen, der für den entsprechenden Frequenzbereich optimiert ist und den Schätzwert $T_{E,est}$ auf Basis des Wellendrehmoments T_{ST} und der Prüflingswinkelgeschwindigkeit ω_E ermittelt. Eine Filtereinheit 10 wandelt dann den von der Schätzeinheit 9 erhaltenen Schätzwert $T_{E,est}$ in das Bedämpfungssignal T_{Damp} um.

Die Filtereinheit 10 ist in Fig. 4 detaillierter schematisch dargestellt. In der Filtereinheit 10 wird zuerst das Signal des Schätzwerts $T_{E,est}$ mittels eines Hochpassfilters 11 vom Gleichanteil befreit. Der nachfolgende Tiefpassfilter 12 ist optional und wird nur benötigt, wenn die höheren Wechselanteile in der Stellgröße für die Belastungsmaschine 2 die Grenzwerte für die Belastungsmaschine 2 überschreiten. Der Hochpassfilter 11 und der Tiefpassfilter 12 können somit als Bandpassfilter 13 angesehen werden, der aus dem Signal des Schätzwerts $T_{E,est}$ einen Bandbereich mit der zu dämpfende Eigenfrequenz herausfiltert.

Um die Totzeiten auszugleichen wird auf das Signal dann in einem Verzögerungsglied 14 eine Verzögerung (Delay) angewendet und das Signal wird in einem Verstärker 15 verstärkt, um das Bedämpfungssignal T_{Damp} in einer für die Dämpfung optimalen Amplitude zu erhalten.

Um die Verzögerung (die auch als Phasenverdrehung interpretiert werden kann) auf einfache Weise zu realisieren, kann das Verzögerungsglied als FIFO-Speicher mit konstanter (bzw. parametrisierbarer) Länge realisiert werden. Eine konstante Länge ist zulässig, da eine bestimmte und bekannte Frequenz (die Eigenfrequenz) gedämpft werden soll. Weiters wird angenommen, dass es sich um eine periodische Störung handelt, was auch mit Versuchsergebnissen übereinstimmt und auch in der Fachliteratur bestätigt wird.

Unter diesen Annahmen sind somit folgende Phasenfehler mit dem FIFO Speicher kompensierbar:

- Systematischer Fehler, da das Dämpfungs-Moment nicht an der Welle eingebracht wird sondern im Luftspalt der Belastungseinheit (90° Phasenfehler)
- Phasenfehler, die sich aufgrund von ungleich-null Phasengang diverser Filternetzwerke in der Regelung ergeben bzw. aufgrund von Totzeiten im Closed-Loop Regelkreis ergeben

Durch eine parametrierbare Verstärkung im Verstärker 15 kann der optimale Grad der Dämpfung eingestellt werden.

Sowohl der parametrisierbare Wert der Verstärkung, als auch die Verzögerung bzw. Phasenkompensation können in einer Simulation des Prüflaufs vorab bestimmt werden und müssen daher nicht über Trial & Error ermittelt werden.

5

Bezugszeichen:

- Prüfling 1
- Belastungsmaschine 2
- Verbindungswelle 3
- 10 Prüfstandsordnung 4
- Automatisierungssystem 5
- Stelleinrichtung 6, 6'
- Geschwindigkeitsregler 7
- Bedämpfungseinheit 8
- 15 Schätzeinheit 9
- Filter 10
- Hochpassfilter 11
- Tiefpassfilter 12
- Bandpassfilter 13
- 20 Verzögerungsglied 14
- Verstärker 15

- Pedalstellung α
- Belastungsmaschinen-Drehmoment T_D
- 25 Wellendrehmoment T_{ST}
- Prüflings-Trägheitsmoment θ_E
- Belastungsmaschinen-Winkelgeschwindigkeit ω_D
- Prüflingswinkelgeschwindigkeit ω_E
- Wellensteifigkeit c
- 30 Wellendämpfung d
- Belastungsmaschinen-Trägheitsmoment θ_D
- Prüflings-Trägheitsmoment θ_E

35

Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung einer Prüfstandsanordnung (4) mit einem Prüfling (1) und mit einer Belastungsmaschine (2), die durch eine Verbindungswelle (3) mit dem Prüfling (1) verbunden ist, dadurch gekennzeichnet, dass ein Schätzwert ($T_{E,est}$) für das innere Drehmoment (T_E) des Prüflings (1) ermittelt wird, wobei aus dem Schätzwert ($T_{E,est}$) unter Berücksichtigung einer zu dämpfenden Eigenfrequenz (f_0) und einer Verzögerung (Delay) ein Bedämpfungssignal (T_{Damp}) ermittelt und im Regelkreis rückgeführt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Schätzwert ($T_{E,est}$) aus der Prüflingswinkelgeschwindigkeit (ω_E) und dem Wellenmoment (T_{ST}) ermittelt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Ermittlung des Bedämpfungssignals (T_{Damp}) aus dem Schätzwert ($T_{E,est}$) ein die zu dämpfende Eigenfrequenz (f_0) umfassender Bandbereich herausgefiltert und das herausgefilterte Signal um eine Verzögerung (Delay) verzögert und um eine Verstärkung (Gain) verstärkt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Parameter für die Verzögerung (del) und/oder die Verstärkung (Gain) und/oder den Bandbereich in einer Simulation vorab bestimmt werden.
5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Verzögerung (Delay) ein konstanter Parameter ist.
6. Vorrichtung zur Regelung einer Prüfstandsanordnung (4) mit einem Prüfling (1) und mit einer Belastungsmaschine (2), die durch eine Verbindungswelle (3) mit dem Prüfling (1) verbunden ist, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung eine Bedämpfungseinheit (8) mit einer Schätzeinheit (9) und einem Filter (10) aufweist, wobei die Schätzeinheit (9) einen Schätzwert ($T_{E,est}$) für das innere Drehmoment (T_E) des Prüflings (1) erstellt und wobei der Filter aus dem Schätzwert ($T_{E,est}$) auf Basis einer zu dämpfenden Eigenfrequenz (f_0) und einer Verzögerung (Delay) ein Bedämpfungssignal (T_{Damp}) erstellt und im Regelkreis rückführt.
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Schätzeinheit (9) den Schätzwert ($T_{E,est}$) aus der Prüflingswinkelgeschwindigkeit (ω_E) und dem Wellenmoment (T_{ST}) ermittelt.
8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Schätzeinheit (9) einen Kalman-Filter aufweist.
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Filter (10) ein als FIFO-Speicher ausgebildetes Verzögerungsglied (14) aufweist.

10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 9 dadurch gekennzeichnet, dass die Prüfstandsordnung (4) einer überkritischen Anordnung entspricht.

1/2

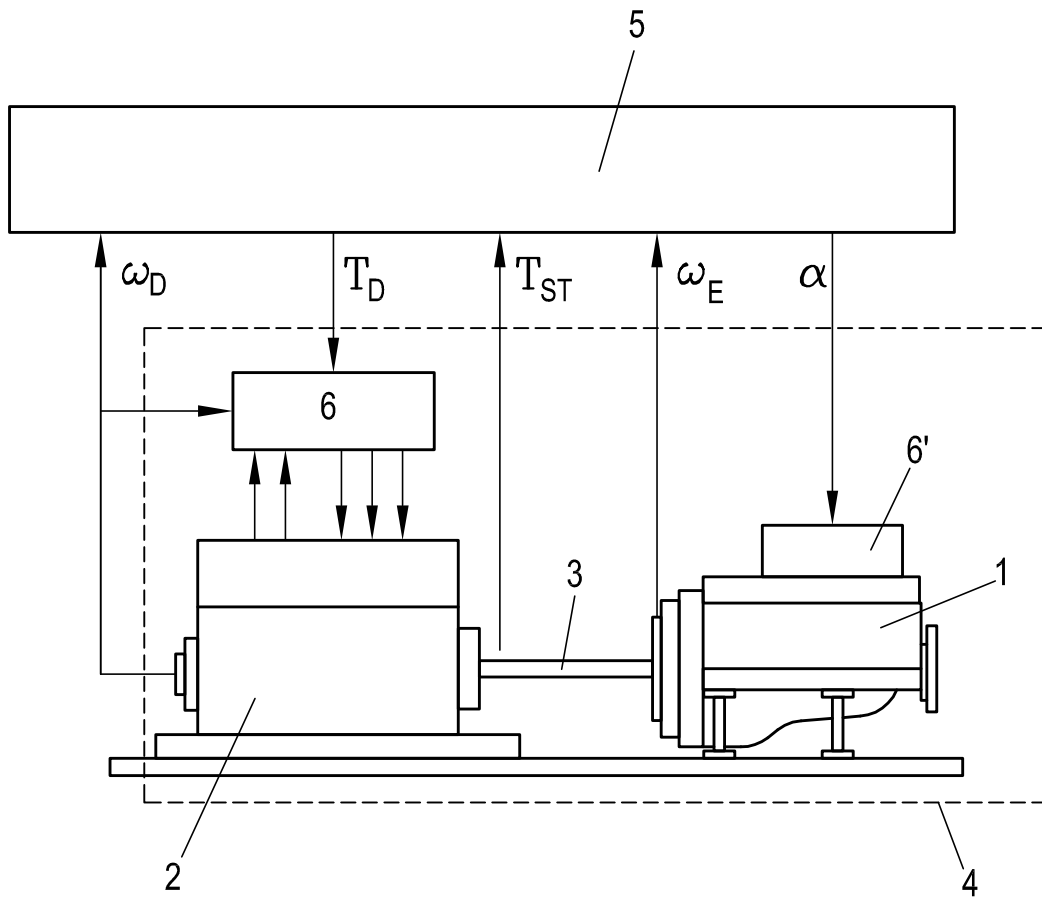


Fig. 1

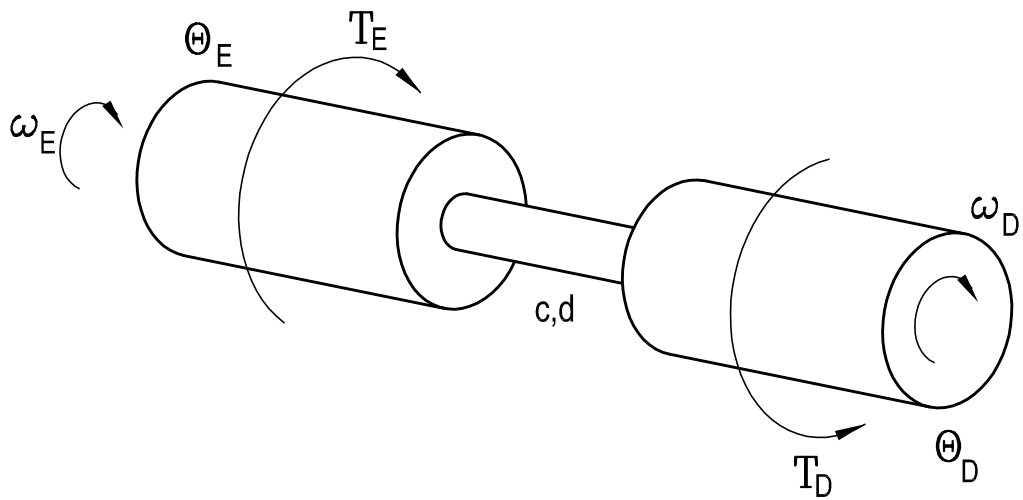


Fig. 2

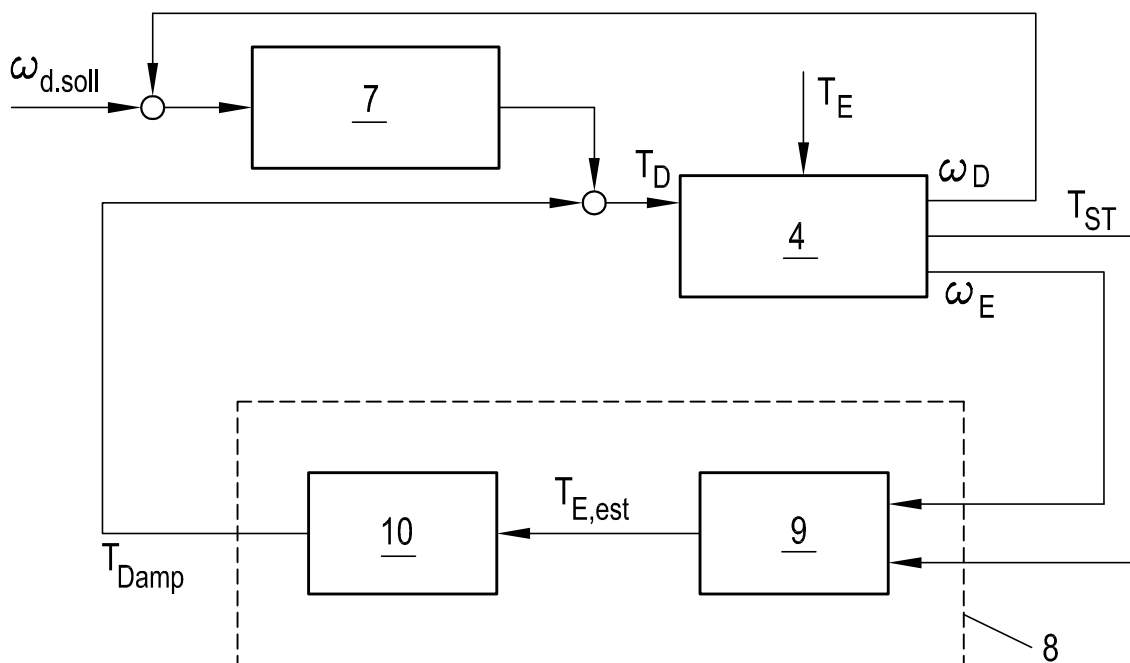


Fig. 3

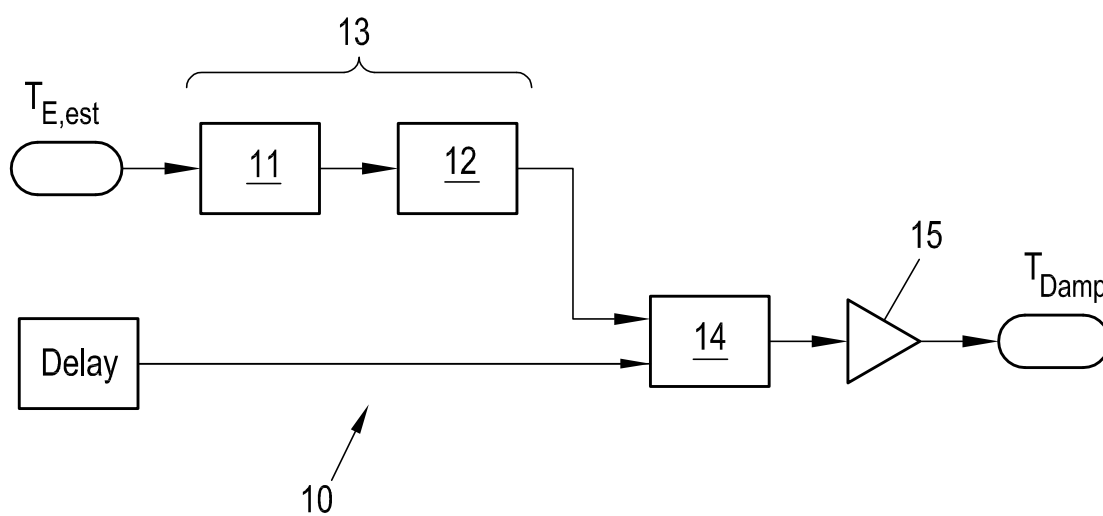


Fig. 4