

(12)

(21) Anmeldenummer:

A 50369/2013

(22) Anmeldetag:

03.06.2013

(43) Veröffentlicht am:

15.08.2013

(51) Int. Cl. : **G01M 17/00**

(2006.01)

G01M 15/00

(2006.01)

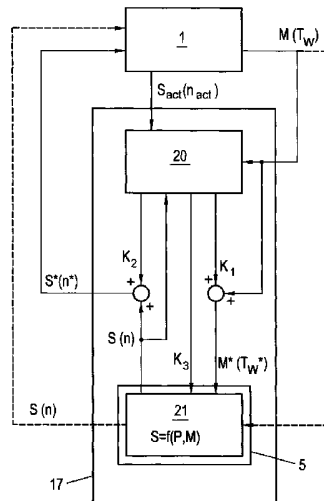
(73) Patentanmelder:

AVL LIST GMBH

8020 GRAZ (AT)

(54) Verfahren zur Reduzierung von Schwingungen in einem Prüfstand

(57) Um in einem Prüfstand (1) für eine Realkomponente



Zusammenfassung

Um in einem Prüfstand (1) für eine Realkomponente (4) und eine Virtualekomponente (5) die Anregung von Schwingungen und Resonanzen zu reduzieren, ist einer der Verfahrensschritte a) Ermitteln eines ersten Korrekturwertes (K_1) aus der Messgröße (M), wobei der erste Korrekturwert (K_1) zur Messgröße (M) addiert wird und die Summe als korrigierte Messgröße (M^*) der Virtualekomponente (5) zur Berechnung der Steuergröße (S) übermittelt wird, b) Ermitteln eines zweiten Korrekturwertes (K_2) aus der berechneten Steuergröße (S), wobei der zweite Korrekturwert (K_2) zur berechneten Steuergröße (S) addiert wird und die Summe als korrigierte Steuergröße (S^*) der Aktuatorik (3) übermittelt wird, c) Ermitteln eines dritten Korrekturwertes (K_3) aus der Messgröße (M), wobei mit dem dritten Korrekturwert (K_3) ein Parameter (P) der Bewegungsgleichung verändert wird, vorgesehen.

Fig. 3

Verfahren zur Reduzierung von Schwingungen in einem Prüfstand

Die gegenständliche Erfindung betrifft ein Verfahren zur Reduzierung der Anregung von unerwünschten Schwingungen und Resonanzen in einem Prüfstand für eine Realkomponente und eine Virtualekomponente, wobei die Realkomponente eine Messgröße der Realkomponente an die Virtualekomponente liefert und von der Virtualekomponente eine Steuergröße für eine Aktuatorik des Prüfstandes erhält, wobei in der Virtualekomponente ein Simulationsmodell mit einer Bewegungsgleichung implementiert ist, das aus der Messgröße die Steuergröße ermittelt.

In der Fahrzeugtechnik geschieht der Vorgang des Testens häufig so, dass Realkomponenten, wie beispielsweise reale Verbrennungsmotoren, reale Reifen, reale Getriebe, reale Batterien, reale Lenksysteme, reale Antriebsstränge, reale Fahrzeuge usw., auf Prüfständen angeordnet werden. Diese zu testende Realkomponente legt häufig auch den Namen des Prüfstandes fest. Man spricht somit von Motorprüfständen, Reifenprüfständen, Getriebeprüfständen, Fahrzeugprüfständen, usw. Diese Prüfstände erlauben beispielsweise das Entwickeln von Verbrennungsmotoren, von Fahrzeugkomponenten oder auch das Aufspüren von Fehlern bei vernetzten Fahrzeugsteuergeräten, die sich auf das Gesamtverhalten des Fahrzeugs auswirken können. Das Testen ist dabei ein Vorgang, mit welchem eine größere Gewissheit darüber gewonnen werden soll, ob technische Objekte, technische Systeme oder technische Erzeugnisse und Abläufe, die Realkomponente oder die Virtualekomponente, innerhalb gewisser Randbedingungen funktionieren und/oder ob bestimmte Eigenschaften und/oder Anforderungen erfüllt werden. Durchgeführte Tests simulieren bzw. antizipieren somit stets reale Vorgänge in simulierten Umgebungen. Die simulierte Umgebung tauscht mit der getesteten Realkomponente im allgemeinsten Fall Stoffströme (z.B. ein Mediumstrom, wie Öl, Wasser, etc.), Energieströme (z.B. elektrischer Strom/Spannung, Drehzahl/Drehmoment, etc.) und Informationsströme (z.B. gemessene Daten, etc.) aus und ermöglicht so die Untersuchung technischer Vorgänge, ohne die zukünftige echte Umgebung der Realkomponente vorauszusetzen, zu beeinträchtigen oder zu gefährden. Ein Testergebnis ist daher aber auch niemals absolut gültig, sondern stellt stets eine Näherung dar. Die Qualität der Näherung hängt unter anderem von der Qualität der simulierten Umgebung ab und von der Qualität, mit der der in der Realität stattfindende Austausch von Energie-, Informations- und Stoffströmen nachgebildet werden kann. Diese simulierte Umgebung wird nachfolgend als Virtualekomponente bezeichnet. Realkomponente und Virtualekomponente zusammen werden als Prüfling bezeichnet. Prüfling und Prüfstand zusammen werden oftmals auch als Hardware-In-The-Loop-System (HiL-System) oder spezieller als „X-In-The-Loop-System“, wobei X für den jeweiligen Prüfling steht, bezeichnet.

Eine Virtualkomponente besteht aus Simulationsmodellen, die im Wesentlichen als Software mit implementierten Algorithmen und mathematischen oder physikalischen Modellen implementiert sind, welche auf einer Simulationseinheit, in der Regel einem Computer, ausgeführt werden.

- 5 Am Prüfstand zur Durchführung der Tests ist in der Regel auch Aktuatorik (eine Anzahl von Aktoren) und Sensorik (eine Anzahl von Sensoren) vorhanden, sowie eventuell eine Ablaufsteuerung (z.B. eine Prüfstandssteuereinheit, eine Automatisierungseinheit, etc.) und Peripherie (wie z.B. ein Datenlogger, usw.). Die Sensoren messen physikalische, chemische oder informationstechnische Zustände oder Zustandsänderungen („Messgrößen“) der Realkomponente und die Aktoren prägen der Realkomponenten gewisse chemische, physikalische oder informationstechnische Zustände oder Zustandsänderungen („Sollgrößen“) auf. Aktoren sind somit das signalwandlerische Gegenstück zu Sensoren. Aktoren und Sensoren verbinden die reale mit der virtuellen Welt des Prüflings, also die Realkomponente und die Virtualkomponente. Beispiele für Aktoren sind elektrische, pneumatische oder hydraulische Belastungseinheiten zum Aufprägen von Drehzahlen, Drehmomenten, Geschwindigkeiten oder Wegen, regelbare elektrische Widerstände, Ölkonditionieranlagen, Luftkonditionieranlagen etc. Beispiele für Sensoren sind Drehmomentsensoren und Drehgeber.
- 10
- 15

Realkomponente, Virtualkomponente, Aktoren und Sensoren sind dynamische Systeme mit einem bestimmten Übertragungsverhalten. Somit ist auch ein Hardware-In-The-Loop-System als Verschaltung dieser Komponenten ein dynamisches System.

20

Ein Beispiel für einen Test ist eine virtuelle Versuchsfahrt eines Hybridfahrzeuges (Verbrennungsmotor und Elektromotor) über die Großglockner Hochalpenstraße unter realistischer Nachbildung der Luftfeuchte, der Lufttemperatur, des Drehzahl- und Drehmomentenverhaltens der Realkomponente „Verbrennungsmotor“, der auf einem Motorprüfstand angeordnet ist. Ziel dieser Erprobungsfahrt sei die Beurteilung des dynamischen Verhaltens des Elektromotors sowie des Temperaturverhaltens der Traktionsbatterie, die als Virtualkomponente simuliert werden, für einen bestimmten Fahrertyp, z.B. ein sportlicher Fahrer mit aggressivem Schaltverhalten. Die Teststrecke (hier die Großglockner Hochalpenstraße), das Fahrverhalten sowie die Fahrumgebung werden ebenfalls simuliert. Bei dieser Testfahrt wird das Hardware-In-The-Loop-System über die Unebenheiten der Fahrbahn, über Windböen, über die Brems- und Lenkaktivitäten des Fahrers und/oder über Verbrennungsströme zu Schwingungen angeregt. Diese Schwingungen werden aber aufgrund des dynamischen Verhaltens der Sensorik und Aktuatorik und aufgrund der durch die Simulation stets begrenzten Abbildungsgenauigkeit der Virtualkomponente nicht exakt identisch sein mit den Schwingungen, die sich bei einer realen Fahrt mit dem Hybridfahrzeug über die Großglockner Hochalpenstraße einstellen.

25

30

35

Ein anderes Beispiel ist in der EP 1 037 030 B1 gezeigt, die ein Verfahren zum Simulieren des Verhaltens eines Fahrzeugs auf einer Fahrbahn an einem Antriebsstrang-Prüfstand offenbart, wobei zur Simulation ein Fahrzeugmodell und ein Reifenmodell (Virtualkomponenten) verwendet wird.

- 5 In der Praxis werden die Virtualkomponenten oft nachträglich auf bereits bestehenden Prüfstandsinfrastrukturen nachgerüstet. Ein klassischer, traditioneller Prüfstand, welcher bisher nur einfache Sollwertprofile aufprägen konnte, wird so zu einer leistungsfähigen X-In-The-Loop Testumgebung, welche es ermöglicht, neue Testaufgaben, wie beispielsweise die oben beschriebene Großglockner Hochalpenfahrt bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen, 10 darzustellen. Die bestehende Prüfstandsaktuatorik und Prüfstandssensorik mit ihren unterlagerten dynamischen Subsystemen und Reglerstrukturen soll hierbei (z.B. aus Kostengründen) häufig unverändert bleiben oder sie ist dem Lieferanten der Virtualkomponente unbekannt. Die gleiche Virtualkomponente wird häufig auch an unterschiedlichen Prüfständen mit unterschiedlichen dynamischen Übertragungsverhalten oder an unterschiedlichen Prüfstandstypen verwendet. Gleichfalls kommt es vor, dass eine Virtualkomponente durch eine 15 andere Virtualkomponente (z.B. mit veränderten Modellen) ersetzt wird.

Ein weiteres Problem mit solchen Virtualkomponenten kann am Prüfstand entstehen, wenn die Virtualkomponenten extreme Lastfälle darstellen sollen, die an oder über die Grenzen der implementierten Aktuatorik, Sensorik oder der Realkomponente gehen.

- 20 Aufgrund des dynamischen Übertragungsverhaltens der am Prüfstand verbauten Aktuatorik und Sensorik, aber auch aufgrund der immer in den verfügbaren Messungen vorhandenen Störungen (z.B. Messrauschen, begrenzte Auflösung, etc.) kommt es häufig zu unerwünschten, unerwartenden und unrealistischen Schwingungs- und Resonanzphänomenen des dynamischen Gesamtsystems, welche die Testergebnisse negativ beeinflussen können und im 25 Extremfall die Verwendung der Virtualkomponenten überhaupt zum Scheitern bringen können.

- Diesem Szenario könnte man klassisch durch die Verwendung von Filtern (z.B. Bessel Filter, Butterworth Filter, etc.) zur Schwingungsdämpfung begegnen, wodurch die verfügbare Dynamik des Prüfstandes jedoch eingeschränkt wird, was unerwünscht ist. Prüfsituationen mit 30 hoher Dynamik, z.B. eine sehr rasche Drehzahl- oder Drehmomentenänderung, könnten dann nicht mehr durchgeführt werden. Eine weitere wichtige negative Eigenschaft, die beim Einsatz von derartigen Filtern auftritt ist die Verzerrung wichtiger dynamischer Zustände beim Testen. Als Beispiel sei bei mechanisch/rotatorischen Prüfständen (z.B. Powertrain) der Drehimpuls genannt, welcher zwischen Real- und Virtualkomponente ausgetauscht wird. Die 35 Verwendung von Filtern bewirkt hier, dass der real aufgebrachte Drehimpuls (z.B. vom Verbrennungsmotor) nicht korrekt in die Virtualkomponente eingebracht wird, was in Folge zu

falschen Testergebnissen führt (z.B. zu hoher/zu geringer Kraftstoffverbrauch). Filter bewirken zudem zusätzlich stets eine Phasenverschiebung, welche unter anderem die Stabilitätsreserve des HiL-Systems negativ beeinflusst.

Es ist daher eine Aufgabe der gegenständlichen Erfindung, ein Verfahren anzugeben, mit dem Virtualkomponenten an Prüfständen weitestgehend ohne Einschränkung des dynamischen Verhaltens und weitestgehend ohne unerwünschte Schwingungs- und Resonanzeffekte betrieben werden können.

Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, indem, zumindest aus der Messgröße ein erster Korrekturwert ermittelt wird, der zur Messgröße addiert wird und die Summe als korrigierte Messgröße der Virtualkomponente zur Berechnung der Steuergröße übermittelt wird oder aus der berechneten Steuergröße ein zweiter Korrekturwert ermittelt wird, der zur berechneten Steuergröße addiert wird und die Summe als korrigierte Steuergröße der Aktuatorik übermittelt wird oder ein dritter Korrekturwert ermittelt wird, welcher einen Parameter der Bewegungsgleichung verändert. Der erste, zweite oder dritte Korrekturwert können aber auch beliebig kombiniert werden.

Damit können unerwünschte Schwingungs- und Resonanzeffekte am Prüfstand wirkungsvoll unterdrückt werden, weitestgehend ohne dabei die Dynamik des Prüfstandes einzuschränken und ohne in die der Aktuatorik unterlagerten Reglerstruktur oder in die Prüfstandssensorik einzugreifen. Das ermöglicht auch die Nachrüstung bestehender Prüfumgebungen mit Virtualkomponenten oder den Austausch von Virtualkomponenten durch andere Virtualkomponenten ohne dabei etwas an der bestehenden Prüfstandsinfrastruktur (Sensorik, Aktuatorik) ändern zu müssen. Damit können allfällige erwünschte systemdynamische Eingriffe in den Prüfstand durch Eingriffe bzw. Ergänzungen in der Virtualkomponente, und vor allem unabhängig von der bereits bestehenden Prüfstandsinfrastruktur, durchgeführt werden.

Ganz besonders vorteilhaft wird als Messgröße das Drehmoment einer Welle zwischen Realkomponente und Aktuatorik verwendet. Das ermöglicht das „Formen“ der am Prüfstand gemessenen Drehmomente durch virtuelle Zusatzmomente, so dass sich das der virtuellen Welt eingeprägte Drehmoment in geeigneter Weise kontinuierlich (als Funktion der Zeit) so verändert, dass im virtuellen System keine unerwünschten Schwingungen auftreten.

Ebenso vorteilhaft wird als Steuergröße eine Drehzahl verwendet. Die sich in der virtuellen Welt der Simulation ergebenden Drehzahlen werden in geeigneter Weise so „umgeformt“, dass im realen System keine unerwünschten Schwingungen oder Resonanzen auftreten.

Die Korrekturwerte lassen sich vorteilhaft durch Optimierung einer Zielfunktion nach dem jeweiligen Korrekturwert ermitteln. Solche Zielfunktionen lassen sich mit bekannten mathematischen Methoden optimieren, bevorzugt auf Echtzeitrechnern in Echtzeit.

Zur Ermittlung des ersten oder dritten Korrekturwertes wird bevorzugt eine Linearkombination einer ersten und zweiten Zielfunktion optimiert, da auf diese Weise unterschiedliche, physikalische Wirkungen ähnliche Einflussgrößen, wie z.B. Energie oder Drehimpuls, berücksichtigt werden können. Dazu wird als erste oder dritte Zielfunktion vorteilhaft ein quadratisches Gütefunktional als Funktion der Winkelgeschwindigkeit oder einer Ableitung davon
5 verwendet. Mit der zweiten Zielfunktion wird vorteilhaft der durch den ersten oder dritten Korrekturwert eingebrachte Drehimpuls oder die veränderte kinetische Energie bewertet, womit sichergestellt wird, dass durch die Korrektur keine zu großen Verfälschungen der Drehbewegung oder der Energiebilanz oder der Impulsgleichungen der Welle hervorgerufen werden.

- 10 Zur Ermittlung des zweiten Korrekturwertes wird bevorzugt eine Zielfunktion implementiert, die die Abweichung zwischen der in der Virtualkomponente berechneten Steuergröße und dem tatsächlichen Wert dieser Steuergröße bewertet.

Für viele Prüfstandstypen, wie z.B. Antriebsstrangprüfstände oder Motorprüfstände, ist es vorteilhaft, als ersten Korrekturwert ein Korrekturmoment zu ermitteln und/oder als zweiten
15 Korrekturwert eine Korrekturdrehzahl zu ermitteln. Drehmoment und Drehzahl sind in solchen Prüfständen die üblichen Mess- und Steuergrößen und üblicherweise als Messwerte verfügbar, sodass sich deren Verwendung vorteilhaft anbietet.

- Als dritter Korrekturwert wird vorzugsweise ein massebehafteter Parameter der Bewegungsgleichung, wie z.B. ein Trägheitsmoment oder eine Masse, verwendet, mit dem sich die Virtualkomponente über die Bewegungsgleichung einfach beeinflussen lässt.
20

- Ganz besonders vorteilhaft können bei der Optimierung Randbedingungen zur Berücksichtigung von vorgegebenen Beschränkungen der Virtualkomponente oder der Realkomponente oder der Aktuatorik berücksichtigt werden. Auf diese Weise können physikalische Grenzen des Prüfstandes berücksichtigt werden, was auch einen wirkungsvollen Schutz der Komponenten des Prüfstandes gegen allfällige Beschädigungen, z.B. durch zu hohe Drehmomente, Beschleunigungen, Drehzahlen, etc., darstellt. Neben der Optimierung der Zielfunktionen wird der Optimierungsalgorithmus in diesem Fall typischerweise Gleichheits- oder Ungleichungsbeschränkungen berücksichtigen. Dadurch können insbesondere bei anspruchsvollen Testszenarios (z.B. Überfahren von Bodenwellen oder Schwellen) einerseits unerwünschte
25 Schwingungen im HiL-System reduziert werden, andererseits können Einschränkungen des Prüfstands bei gleichzeitiger Maximierung des Realitätsanspruchs garantiert eingehalten werden.
30

- 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
35

Fig.1 und 2 Beispiele einer Konfiguration einer Hardware-In-The-Loop-Testumgebung, Fig.3 die erfindungsgemäße Korrektur der Messgröße oder der Steuergröße und Fig.4 die Ermittlung des ersten Korrekturwertes am Beispiel eines Radsimulationsmodells.

5 Mit Fig.1 ist die grundsätzliche Konfiguration einer Hardware-In-The-Loop-Testumgebung dargestellt. Auf einem Prüfstand 1, z.B. ein Motorprüfstand, ist eine Realkomponente 4, z.B. ein Verbrennungsmotor, angeordnet, der über eine Verbindungswelle 2 mit einer Aktuatorik 3, z.B. eine Belastungsmaschine in Form eines elektrischen Dynamometers, verbunden ist. Die Virtualkomponente 5 besteht aus einem Simulationsmodell 21, z.B. ein Fahrzeugsimulationsmodell 6, ein Umgebungssimulationsmodell 7, ein Fahrersimulationsmodell 8, ein Straßensimulationsmodell 9, ein Radsimulationsmodell 10, etc., die als Software in einer Simulationseinrichtung 17, z.B. in Form eines Computers mit benötigter Software und implementierten Algorithmen, laufen. Je nach Testlauf können unterschiedliche und mehrere solcher Komponentensimulationsmodelle, die gemeinsam das Simulationsmodell 21 bilden, zum
10 Einsatz kommen. In der Virtualkomponente 5 wird das Fahrzeug oder eine Komponente davon durch eine virtuelle Welt bewegt. Realkomponente und Virtualkomponente interagieren über Eingangsschnittstellen 11 (Daten von Sensorik 18) und Ausgangsschnittstellen 12 (Daten zu Aktuatorik). Am Prüfstand 1 wird der jeweils aktuelle virtuelle Zustand gesteuert von der Virtualkomponente 5 an der Realkomponente 4 und an der Aktuatorik 3 eingestellt, so-
15 dass die Realkomponente 4 die Zustände aus der Virtualkomponente 5, also die virtuelle Welt, erfährt und über die zeitlich Abfolge dieser Zustände getestet wird.

Dazu wird am Prüfstand 1 z.B. das Drehmoment T zwischen Realkomponente 4 und Aktuatorik 3 oder die Drehzahl n der Realkomponenten oder der Aktuatorik 3 (z.B. in Form einer elektrischen Belastungsmaschine) mittels geeigneter Sensorik 18 gemessen, z.B. über eine
25 Drehmomentmesseinrichtung an der Verbindungswelle 2 oder einer Drehzahlmesseinrichtung der Simulationseinrichtung 17, und der Virtualkomponente 5 über eine Eingangsschnittstelle 11 zur Verfügung gestellt. Aus dieser Messgröße M (Drehmoment T oder Drehzahl n) berechnet, in der Regel nach einer geeigneten Signalaufbereitung, das Simulationsmodell 21 in der Simulationseinrichtung 5 eine Steuergröße S für die Aktuatorik 3, z.B. eine Soll-
30 drehzahl n , eine Steuergröße für die Realkomponente 4, z.B. eine Drosselklappenstellung α , etc. Diese Steuergrößen S werden über eine Ausgangsschnittstelle 12 der Simulationseinrichtung 17 an den Prüfstand 1 übergeben und am Prüfstand 1 von der Aktuatorik 3 und eventuell weiteren geeigneten nicht dargestellten Aktuatoren, eventuell mittels geeigneter Regelungseinheiten, eingestellt.

35 Die Messgröße im Sinne des gegenständlichen Verfahrens muss aber nicht direkt gemessen werden, sondern kann auch aus anderen gemessenen Größen abgeleitet oder gebildet werden.

den, z.B. in der Virtualeinheit 5. Ein Beispiel dafür ist ein an sich bekannter Drehmomentenschätzer, der das Drehmoment T der Verbindungswelle 2 anhand der tatsächlichen gemessenen Drehzahl n der Verbindungswelle 2, bzw. der damit verbundenen Aktuatorik 3, schätzt. In der Regel wird auch nicht das direkt gemessene Signal als Messgröße verwendet, sondern ein entsprechend aufbereitetes (z.B. gefiltertes) Signal.

In Fig.2 ist als weiteres Beispiel eine Hardware-In-The-Loop-Testumgebung für einen Antriebsstrang als Realeinheit 4 dargestellt. Am Prüfstand 1 ist dazu der gesamte Antriebsstrang aufgebaut. Dieser umfasst hier einen Verbrennungsmotor 13, eine Kupplung 14, ein Getriebe 15 und ein Differentialgetriebe 16. Die Verbindungswellen 2_{FL} , 2_{FR} , 2_{RL} , 2_{RR} werden hier durch die Halbwellen des Antriebsstranges gebildet und sind mit Aktuatorik 3_{FL} , 3_{FR} , 3_{RL} , 3_{RR} , z.B. in Form von elektrischen Belastungsmaschinen (Dynamometer), verbunden. Für die Virtualeinheit 5 werden hier die Drehmomente T_{FL} , T_{FR} , T_{RL} , T_{RR} der Verbindungswellen 2_{FL} , 2_{FR} , 2_{RL} , 2_{RR} erfasst und die Virtualeinheit 5 berechnet mit dem darin implementierten Simulationsmodell 21 die Steuergrößen für die Realeinheit 4, hier für den Verbrennungsmotor 13 (z.B. die Drosselklappenstellung α), die Kupplung 14 (z.B. ein Kupplungssignal K) und das Getriebe 15 (z.B. ein Gangsignal G), und die Steuergrößen für die Aktuatorik 3_{FL} , 3_{FR} , 3_{RL} , 3_{RR} , hier Drehzahlen n_{FL} , n_{FR} , n_{RL} , n_{RR} . Ein Prüflauf in der Hardware-In-The-Loop-Testumgebung funktioniert hier genauso wie oben mit Bezugnahme auf Fig.1 beschrieben.

Selbstverständlich sind auch noch andere Konfigurationen für eine Realeinheit 4 denkbar, wobei der grundlegende Aufbau der Hardware-In-The-Loop-Testumgebung und der Ablauf eines Tests in der Hardware-In-The-Loop-Testumgebung unverändert bleibt.

Im Simulationsmodell 21 der Virtualeinheit 5 wird aus der von der Sensorik 18 des Prüfstandes 1 gelieferten Messgröße M , z.B. ein (oder mehrere) Drehmoment T einer (oder mehrerer) Halbwelle oder einer Verbindungswelle 2, eine (oder mehrere) Steuergröße S für die Aktuatorik 3 berechnet. Dieses Drehmoment T kann aber auch ein nur geschätztes oder aufgrund der Messwerte anderer Sensoren berechnetes Drehmoment sein. Dazu ist im Simulationsmodell 21 eine Bewegungsgleichung mit zumindest einem Parameter P , z.B. in Form einer Differential-Algebraischen Gleichung, implementiert, die mehrmals pro Sekunde, z.B. jede Millisekunde, gelöst wird. Es können natürlich auch mehrere Bewegungsgleichungen, z.B. ein System von gekoppelten Bewegungsgleichungen, implementiert sein. Allgemein gilt $S=f(P,M)$.

In der Simulationseinrichtung 17 ist eine Korrekturereinheit 20 vorgesehen (Fig.3), die aus der entsprechend aufbereiteten Messgröße M , z.B. ein Wellendrehmoment T_w , bevorzugt zu jedem Zeitpunkt, in dem die Bewegungsgleichung gelöst wird (z.B. durch numerische Integration der Differentialgleichungen der Bewegung), einen ersten Korrekturwert K_1 berech-

net, welcher die Virtualkomponente 5 in geeigneter Weise beruhigt und unerwünschte Resonanzerscheinungen, welche sich aufgrund der Unvollkommenheit des Prüfstandes 1 – insbesondere der Aktuatorik 3 und der Sensorik 18 – ergeben, bestmöglich kompensiert. Der erste Korrekturwert K_1 ist daher ein sich kontinuierlich änderndes Signal und wird vorzeichenrichtig zur Messgröße M , hier Drehmoment T_w , addiert und die Summe aus der Messgröße M und dem Korrekturwert K_1 wird der Virtualkomponente 5 als korrigierter Messwert M^* , hier ein korrigiertes Wellendrehmoment T_w^* , zur Berechnung der Steuergröße S für die Aktuatorik 3 eingespeist.

Dieses „Torque Shaping“ geschieht ohne Eingriff in die Gesamtstruktur des Prüfstandes 1, also insbesondere ohne Eingriff in die Reglerstruktur des Prüfstandes 1.

Der beschriebene, erfindungsgemäße Ansatz lässt sich auf beliebige dynamische Systeme erweitern, wobei als Messgröße M und Steuergröße S anstelle von Drehmoment und Drehzahl dann andere physikalische Größen, wie z.B. elektrische Spannung, mechanische Kraft, usw., verwendet werden können.

Alternativ oder zusätzlich berechnet die Korrekturereinheit 20 aus der berechneten Steuergröße S , hier z.B. Drehzahl n , für die Aktuatorik 3 einen zweiten Korrekturwert K_2 , der zur berechneten Steuergröße S addiert wird und die Summe als korrigierte Steuergröße S^* , hier eine korrigierte Drehzahl n^* , der Aktuatorik 3 zur Einstellung am Prüfstand 1 zur Verfügung gestellt wird. Der zweite Korrekturwert K_2 wird bevorzugt wieder zu jedem Zeitpunkt, in dem die Bewegungsgleichungen gelöst werden, berechnet und stellt wieder ein sich kontinuierlich änderndes Signal dar. Diese korrigierte Steuergröße S^* hat die Aufgabe, unerwünschte Schwingungseffekte, welche sich aufgrund des unvollkommenen Übertragungsverhaltens der Aktuatorik 3 ergeben, von der Realkomponente 4 am Prüfstand 1 fernzuhalten.

Dieses „Speed Shaping“ erfolgt wieder ohne Eingriff in die Gesamtstruktur des Prüfstandes 1, lässt also insbesondere die Reglerstruktur des Prüfstandes 1 unverändert.

Alternativ oder zusätzlich berechnet die Korrekturereinheit 20 aus der Messgröße M einen dritten Korrekturwert K_3 , der zur Veränderung eines Parameters P der Bewegungsgleichung in der Virtualkomponente 5 dient, vorzugsweise zur Veränderung einer Systemträgheit (z.B. der Radträgheit oder Fahrzeugträgheit) oder einer Masse (z.B. der Fahrzeugmasse). Dieser korrigierte Parameter P hat die Aufgabe, unerwünschte Schwingungseffekte der Virtual- 5 und somit in Konsequenz auch der Realkomponente 4 zu unterdrücken.

Dieses „Parameter Shaping“ erfolgt dabei wieder ohne Eingriff in die Gesamtstruktur des Prüfstandes 1, also insbesondere ohne Beeinflussung der Reglerstruktur des Prüfstandes 1.

Nachfolgend werden exemplarisch mögliche Verfahren zur Ermittlung der Korrekturwerte K_1 , K_2 und K_3 erläutert.

Allgemein ist bei den nachfolgend exemplarisch ausformulierten Verfahren in der Korrektur-
einheit 20 eine Zielfunktion J als Funktion des ersten oder zweiten oder dritten Korrekturwer-
tes K_1, K_2, K_3 implementiert, die bezüglich des ersten, zweiten oder dritten Korrekturwertes
 K_1, K_2, K_3 optimiert, hier minimiert, wird, also in allgemeiner Schreibweise $J(K_{1,2,3}) = \min_{K_{1,2,3}}$

- 5 Für die Ermittlung des ersten Korrekturwertes K_1 ist in der Virtualkomponente 5 zumindest
ein Simulationsmodell 21 eines über eine Welle mit der Realkomponente 4 verbundenen
Teils des Fahrzeugs implementiert, z.B. wie in Fig.4 ein Radsimulationsmodell 10 eines
Fahrzeugrades, das mit der Halbwelle des Antriebsstranges (Realkomponente 4 in Fig.2)
verbunden ist, oder ein Simulationsmodell eines Zweimassenschwungrades oder einer
10 Kupplung, das/die mit der Kurbelwelle eines Verbrennungsmotors (Realkomponente 4 in
Fig.1) verbunden ist. Als Messgröße M wird dabei jeweils das Wellenmoment T_w , und gege-
benenfalls weitere Messgrößen, wie z.B. die Temperatur, verwendet, das entweder direkt
gemessen wird oder aus anderen Messgrößen geschätzt oder berechnet wird.

- Im Beispiel eines Radsimulationsmodells 10, wie in Fig.4 dargestellt, wird aus dem gemes-
senen Wellenmoment T_w die Steuergröße S für die Aktuatorik 3 am Prüfstand 1, z.B. wie
15 hier eine Drehzahl $n_{\text{dmd, sim}}$ für eine elektrische Belastungsmaschine, ermittelt. Das Radsimu-
lationsmodell 10 kann dabei auch mit anderen Simulationsmodellen, wie z.B. einem Rei-
fensimulationsmodell, einem Straßensimulationsmodell, etc., verbunden sein und mit diesen
Daten austauschen. Das Wellenmoment T_w setzt sich zusammen aus einem Reifenmoment
20 T_{tire} zwischen Reifen und Straße, einem Bremsmoment T_{brake} und weiteren optionalen Hilfs-
momenten T_{opt} , wie z.B. ein elektrisches Antriebsmoment bei einem Radnabenmotor.

- In der Korrekturereinheit 20 ist eine Zielfunktion J als Funktion des ersten Korrekturwertes K_1 ,
hier in Form eines Korrekturmoments T_{cor} , implementiert. Diese Zielfunktion J wird bezüglich
des ersten Korrekturwertes K_1 minimiert, also in allgemeiner Schreibweise $J(K_1) = \min_{K_1}$. Der
25 derart ermittelte Korrekturwert K_1 wird zur Messgröße M aus dem Prüfstand 1, hier das Wel-
lenmoment T_w , addiert und die korrigierte Messgröße M^* , hier ein korrigiertes Wellenmoment
 T^* , wird dem Radsimulationsmodell 10 der Virtualkomponente 5 zur Ermittlung der Steuer-
größe S für den Prüfstand 1 übergeben.

- In der Korrekturereinheit 20 könnte dazu eine erste Zielfunktion J_{energy} in Form einer quadrati-
schen Gütefunktion implementiert sein. Dazu bietet sich z.B. eine Zielfunktion an, die die
30 Ruckenergie, z.B. in der Form der „Wirkung der Ruckenergie“ $J_{\text{energy}} = \frac{1}{2} J_w \int_{\tau=t}^{t+T} \|\ddot{\omega}(\tau)\|_2^2 d\tau$,

oder der „Wirkung der Beschleunigungsenergie“, z.B. in der Form $J_{\text{energy}} = \frac{1}{2} J_w \int_{\tau=t}^{t+T} \|\dot{\omega}(\tau)\|_2^2 d\tau$,

bewertet. Durch die Integrationsgrenzen wird über einen Zeitraum T in die Zukunft gerechnet, um zukünftigen, zu erwartenden Zuständen entgegen zu wirken. Durch das Korrekturmoment T_{cor} wird ein Drehmoment hinzugefügt, das auch den übertragenen Drehimpuls verändert. Um die Simulation nicht zu stark zu verfälschen, soll dieser Drehimpuls, der eine
 5 Verfälschung der Drehzahl bewirken würde, im zeitlichen Mittel möglichst gering sein. Es

wird daher eine zweite Zielfunktion J_{disto} , z.B. in der Form $J_{disto} = \int_{v=0}^t \int_{\tau=0}^v \frac{T_{cor}(\tau, v)}{J_W} d\tau dv$ ver-

wendet, die den durch das Korrekturmoment T_{cor} eingebrachten Drehimpuls bewertet. Die für die Ermittlung des ersten Korrekturwertes K_1 zu minimierende Gesamtzielfunktion J wird dann als Linearkombination der ersten und zweiten Zielfunktion mit den Gewichtungsfaktoren α_1 ,
 10 α_2 angeschrieben, $J = \alpha_1 J_{energy} + \alpha_2 J_{disto}$. Das gesuchte Korrekturmoment T_{cor} ergibt sich dann durch Minimierung dieser Zielfunktion nach dem Korrekturmoment T_{cor} .

Für die Gesamtzielfunktion J können natürlich auch noch weitere oder andere Zielfunktionen berücksichtigt werden, z.B. könnten beide obigen energie-/wirkungs-basierten Zielfunktionen berücksichtigt werden. Für die Durchführung der Minimierung benötigt die Korrektoreinheit
 15 20 zumindest die Steuergröße für die Belastungsmaschine, hier die Drehzahl $n_{dmd, sim}$ zur Ermittlung der Winkelgeschwindigkeit ω . Das Trägheitsmoment des rotierenden Teiles J_W (z.B. des Rades oder der Kupplung) kann als bekannt vorausgesetzt werden. Der erste Korrekturwert K_1 , hier das Korrekturmoment T_{cor} , kann dann in der Virtualeinheit 5, z.B. im Radsimulationsmodell 10, verarbeitet werden, wie oben beschrieben.

Es kann aber auch vorgesehen sein, dass in der Korrektoreinheit 20 ebenfalls ein, vorzugsweise das gleiche, Radsimulationsmodell 15 implementiert ist. Dann kann die Korrektoreinheit 20 bei Kenntnis des Wellenmoments T_w mit dem ermittelten Korrekturmoment T_{cor} ein korrigiertes Gesamttradmoment T_w^* ermitteln und der Virtualeinheit 5 übergeben, wie in Fig.4 schematisch dargestellt.

Für die Ermittlung des zweiten Korrekturwertes K_2 ist in der Korrektoreinheit 20 eine Zielfunktion J als Funktion des zweiten Korrekturwertes K_2 , hier in Form einer Korrekturdrehzahl n_{cor} , implementiert. Diese Zielfunktion J wird bezüglich des zweiten Korrekturwertes K_2 minimiert, also in allgemeiner Schreibweise $J(K_2) = \min_{K_2}$. Als Zielfunktion könnte z.B. eine Funktion

implementiert sein, die die Abweichung zwischen der in der Virtualeinheit 5 berechneten Steuergröße S und dem tatsächlichen Wert dieser Steuergröße S_{act} , der gemessen wer-

den kann, bewertet, z.B. in der Form $J = \int_0^t \|S(\tau) - S_{act}(\tau)\|_2^2 d\tau$. Am Beispiel einer Drehzahl n

als Steuergröße S kann die Zielfunktion J als $J = \int_0^t \|n_{dmd, sim}(\tau) - n_{act}(\tau)\|_2^2 d\tau$ angeschrieben

werden, wobei n_{act} die tatsächliche Drehzahl der Aktuatorik 3, z.B. einer Belastungsmaschine, ist. Die Zielfunktion J wird nach $n_{dmd, sim}$ minimiert und das Ergebnis dieser Optimierung wird als Korrekturdrehzahl n_{cor} wie oben beschrieben verwendet.

Die Ermittlung des dritten Korrekturwertes K_3 kann analog zur Ermittlung des ersten Korrekturwertes K_1 durchgeführt werden. Es könnte dazu wieder eine Zielfunktion J als Linearfunktion zweier Zielfunktionen verwendet werden. Mit einer ersten Zielfunktion könnte wieder die Wirkung der Ruckenergie oder der Beschleunigungsenergie (J_{energy}) wie oben beschrieben bewertet wird. Die zweite Zielfunktion könnte z.B. die durch den veränderten Parameter P , hier das Trägheitsmoment J_w , geänderte Rotationsenergie (J_{disto}) bewerten, wobei die durch den geänderten Parameter P veränderte Rotationsenergie im zeitlichen Mittel wieder möglichst gering sein soll, um Verfälschungen der Drehzahl, des Impulses oder der kinetischen Systemenergie zu minimieren. Damit könnte J_{disto} z.B. in der Form

$$J_{disto} = \int_{v=0}^t \int_{\tau=0}^v J_{cor}(\tau, v) \|\omega(\tau, v)\|_2^2 d\tau dv \quad \text{oder} \quad J_{disto} = \int_{v=0}^t \int_{\tau=0}^v J_{cor}(\tau, v) \omega(\tau, v) d\tau dv \quad \text{angeschrieben}$$

werden. Die Zielfunktion J kann dann nach dem dritten Korrekturwert K_3 , hier das Korrekturträgheitsmoment J_{cor} , optimiert werden, mit dem dann das Trägheitsmoment J_w in der Virtualkomponente 5, bzw. in der Bewegungsgleichung im Simulationsmodell der Virtualkomponenten 5, korrigiert wird, z.B. vorzeichenrichtig zu J_w addiert wird.

Ein besonderer Vorteil bei der Optimierung von Zielfunktionen zur Ermittlung der Korrekturwerte K_1 , K_2 , K_3 kann darin gesehen werden, dass bei der Optimierung sehr einfach Randbedingungen berücksichtigt werden können, womit auf vorgegebene Beschränkungen der Virtualkomponente 5, z.B. eine maximale Radgeschwindigkeit, oder der Realkomponente 4, z.B. ein maximales Drehmoment eines Verbrennungsmotors, oder der Aktuatorik 3, z.B. eine maximale Drehbeschleunigung einer elektrischen Belastungsmaschine, Rücksicht genommen werden kann.

Z.B. könnten für die Ermittlung des ersten und dritten Korrekturwertes K_1 , K_3 die folgenden Randbedingungen berücksichtigt werden,

$$\omega(\tau) \leq \omega_{\max} \quad (t \leq \tau \leq t+T)$$

$$|\dot{\omega}(\tau)| \leq \dot{\omega}_{\max} \quad (t \leq \tau \leq t+T)'$$

womit Grenzwerte für die Rotationsgeschwindigkeit und die Rotationsbeschleunigung, z.B. des Fahrzeugrades oder der Kupplung, vorgegeben werden können.

Für die Ermittlung des zweiten Korrekturwertes K_2 könnten ähnliche Randbedingungen berücksichtigt werden, z.B.

$$\begin{aligned} n_{act}(\tau) &\leq n_{max} \quad (t \leq \tau \leq t+T) \\ |\dot{n}_{act}(\tau)| &\leq \dot{n}_{max} \quad (t \leq \tau \leq t+T)' \end{aligned}$$

womit Grenzwerte für die Drehzahl und die Drehbeschleunigung vorgegeben werden können.

- 5 Für die Optimierung der obigen Zielfunktionen J gibt es hinreichend bekannte Lösungsverfahren, z.B. dynamic programming, receding horizon optimization, u.ä., die hier nicht näher erläutert werden. Die Zielfunktion J wird bevorzugt in Echtzeit vorzugsweise auf einem Echtzeitrechner optimiert.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Reduzierung der Anregung von Schwingungen und Resonanzen in einem Prüfstand (1) für eine Realkomponente (4) und eine Virtualekomponente (5), wobei die Realkomponente (4) eine Messgröße (M) der Realkomponente (4) an die Virtualekomponente (5) liefert und von der Virtualekomponente (5) eine Steuergröße (S) für eine Aktuatorik (3) des Prüfstandes (1) erhält, wobei in der Virtualekomponente (5) ein Simulationsmodell (21) mit einer Bewegungsgleichung implementiert ist, das aus der Messgröße (M) die Steuergröße (S) berechnet, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest einer der folgenden Verfahrensschritte a), b) oder c) gesetzt wird,
 - a) Ermitteln eines ersten Korrekturwertes (K_1) aus der Messgröße (M), wobei der erste Korrekturwert (K_1) zur Messgröße (M) addiert wird und die Summe als korrigierte Messgröße (M') der Virtualekomponente (5) zur Berechnung der Steuergröße (S) übermittelt wird
 - b) Ermitteln eines zweiten Korrekturwertes (K_2) aus der berechneten Steuergröße (S), wobei der zweite Korrekturwert (K_2) zur berechneten Steuergröße (S) addiert wird und die Summe als korrigierte Steuergröße (S') der Aktuatorik (3) übermittelt wird,
 - c) Ermitteln eines dritten Korrekturwertes (K_3) aus der Messgröße (M), wobei mit dem dritten Korrekturwert (K_3) ein Parameter (P) der Bewegungsgleichung verändert wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Messgröße (M) das Drehmoment (T_w) einer Verbindungswelle (2) zwischen Realkomponente (4) und Aktuatorik (3) verwendet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Steuergröße (S) eine Drehzahl (n) verwendet wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Ermittlung des ersten oder zweiten oder dritten Korrekturwertes (K_1 , K_2 , K_3) eine Zielfunktion (J) als Funktion des ersten oder zweiten oder dritten Korrekturwertes (K_1 , K_2 , K_3) implementiert ist, die hinsichtlich des ersten oder zweiten oder dritten Korrekturwertes (K_1 , K_2 , K_3) optimiert wird.
5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Ermittlung des ersten oder dritten Korrekturwertes (K_1 , K_3) als Zielfunktion (J) eine Linearkombination einer ersten und zweiten Zielfunktion (J_{energy} , J_{disto}) verwendet wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** als erste Zielfunktion (J_{energy}) ein quadratisches Gütefunktional als Funktion der Winkelgeschwindigkeit (ω) oder

einer Ableitung davon verwendet wird, vorzugsweise in der Form $J_{energy} = \frac{1}{2} J_W \int_{\tau=t}^{t+T} \|\ddot{\omega}(\tau)\|_2^2 d\tau$

oder $J_{energy} = \frac{1}{2} J_W \int_{\tau=t}^{t+T} \|\dot{\omega}(\tau)\|_2^2 d\tau$.

7. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit der zweiten Zielfunktion (J_{disto}) der durch den ersten Korrekturwert (K_1) zusätzlich eingebrachte Drehimpuls be-

wertet wird, vorzugsweise in der Form $J_{disto} = \int_{v=0}^t \int_{\tau=0}^t \frac{T_{cor}(\tau, v)}{J_W} d\tau dv$.

8. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit der zweiten Zielfunktion (J_{disto}) die durch den dritten Korrekturwert (K_3) veränderte kinetische Energie bewertet

wird, vorzugsweise in der Form $J_{disto} = \int_{v=0}^t \int_{\tau=0}^v J_{cor}(\tau, v) \|\omega(\tau, v)\|_2^2 d\tau dv$ oder

$$J_{disto} = \int_{v=0}^t \int_{\tau=0}^v J_{cor}(\tau, v) \omega(\tau, v) d\tau dv.$$

9. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** als erster Korrekturwert (K_1) ein Korrekturmoment (T_{cor}) ermittelt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** als dritter Korrekturwert (K_3) ein Korrekturträgeitsmoment (J_{cor}) ermittelt wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Ermittlung des zweiten Korrekturwertes (K_2) eine Zielfunktion (J) implementiert wird, die die Abweichung zwischen der in der Virtualkomponente berechneten Steuergröße (S) und dem tatsächlichen Wert dieser Steuergröße (S_{act}) bewertet, vorzugsweise in der Form

$$J = \int_0^t \|S(\tau) - S_{act}(\tau)\|_2^2 d\tau.$$

12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** als zweiter Korrekturwert (K_2) eine Korrekturdrehzahl (n_{cor}) berechnet wird, vorzugsweise aus

$$J = \int_0^t \|n_{dmd, sim}(\tau) - n_{act}(\tau)\|_2^2 d\tau, \text{ indem nach der Drehzahl } (n_{dmd, sim}) \text{ optimiert wird und die ermit-}$$

telte Drehzahl ($n_{dmd, sim}$) als Korrekturdrehzahl (n_{cor}) verwendet wird.

13. Verfahren nach Anspruch 2 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Optimierung Randbedingungen zur Berücksichtigung von vorgegebenen Beschränkungen der Virtualkomponente (5) oder der Realkomponente (4) oder der Aktuatorik (3) verwendet werden.

1/3

Fig. 1

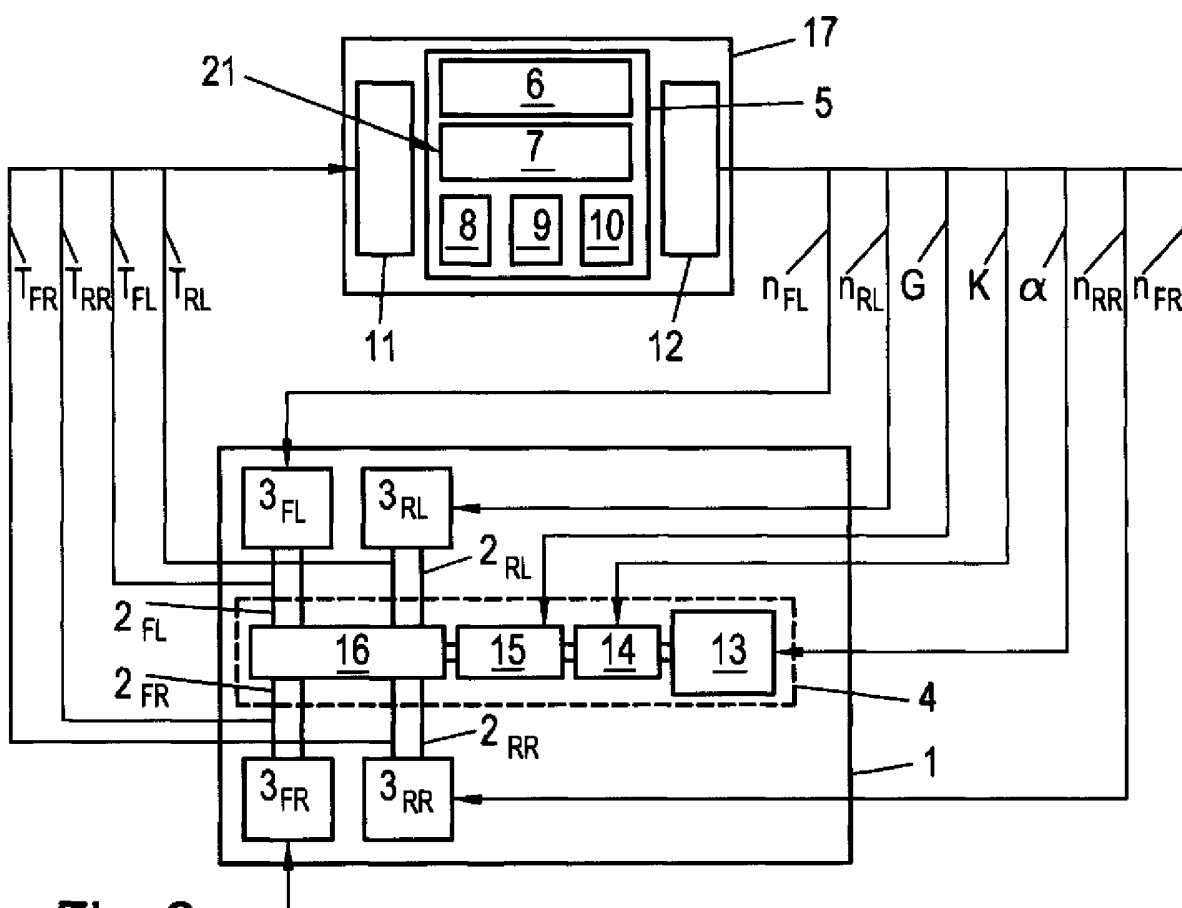
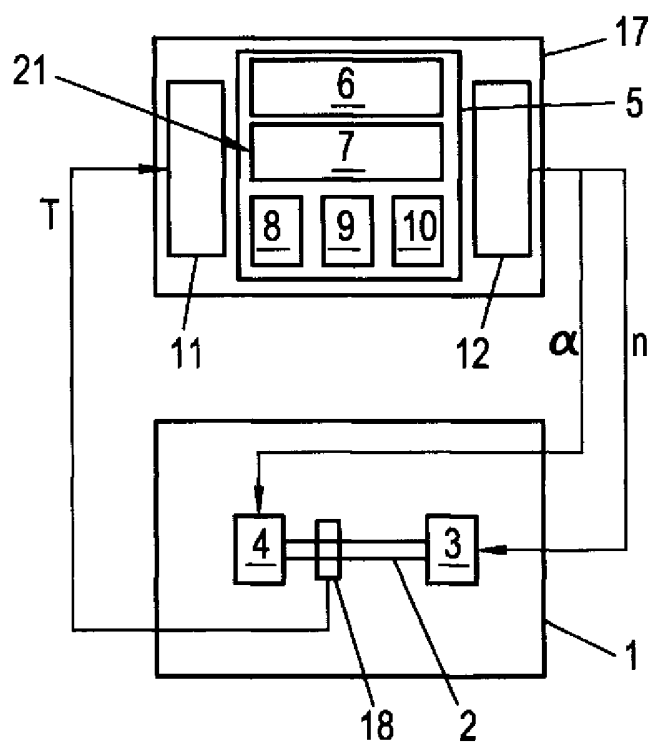


Fig. 2

2/3

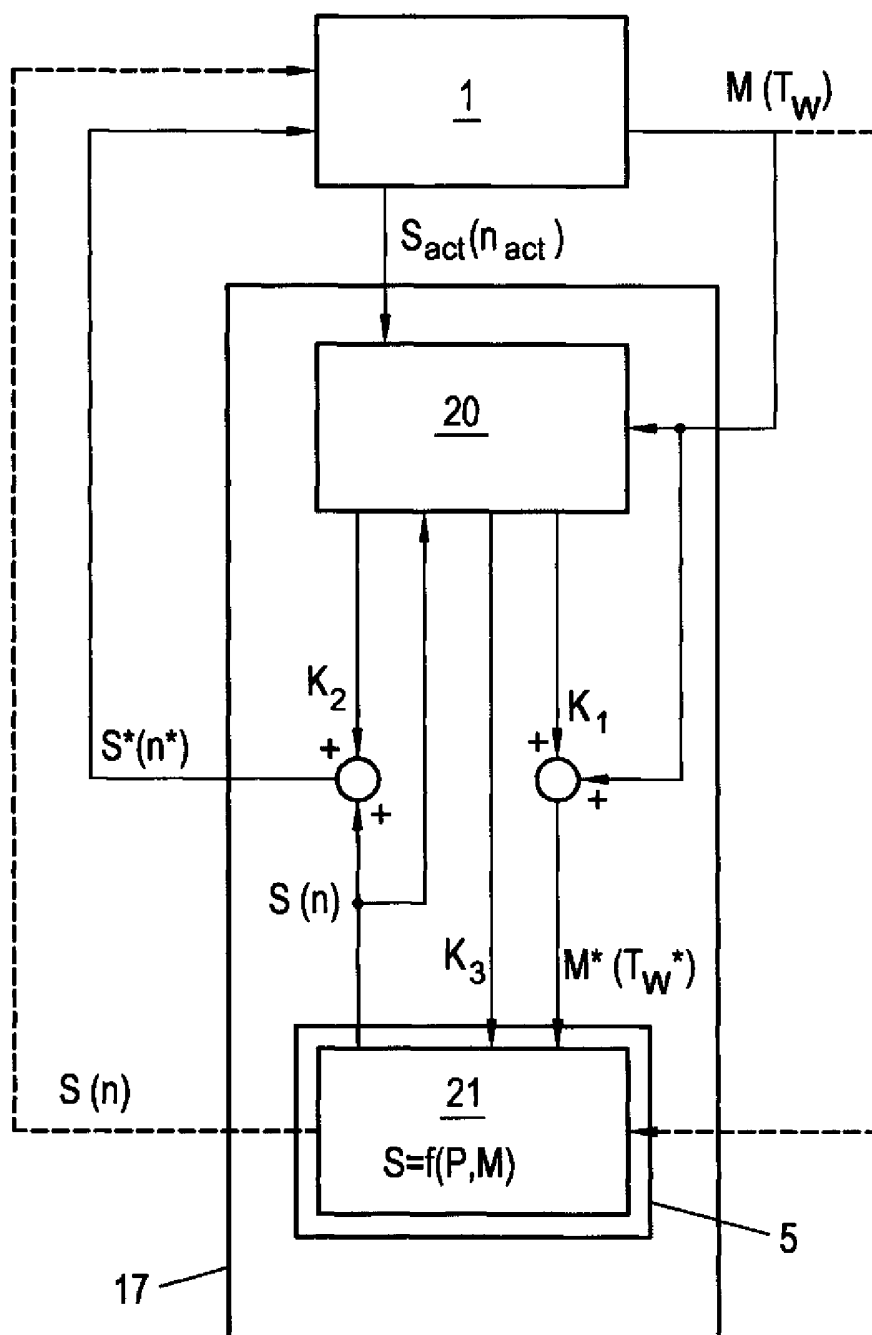


Fig. 3

3/3

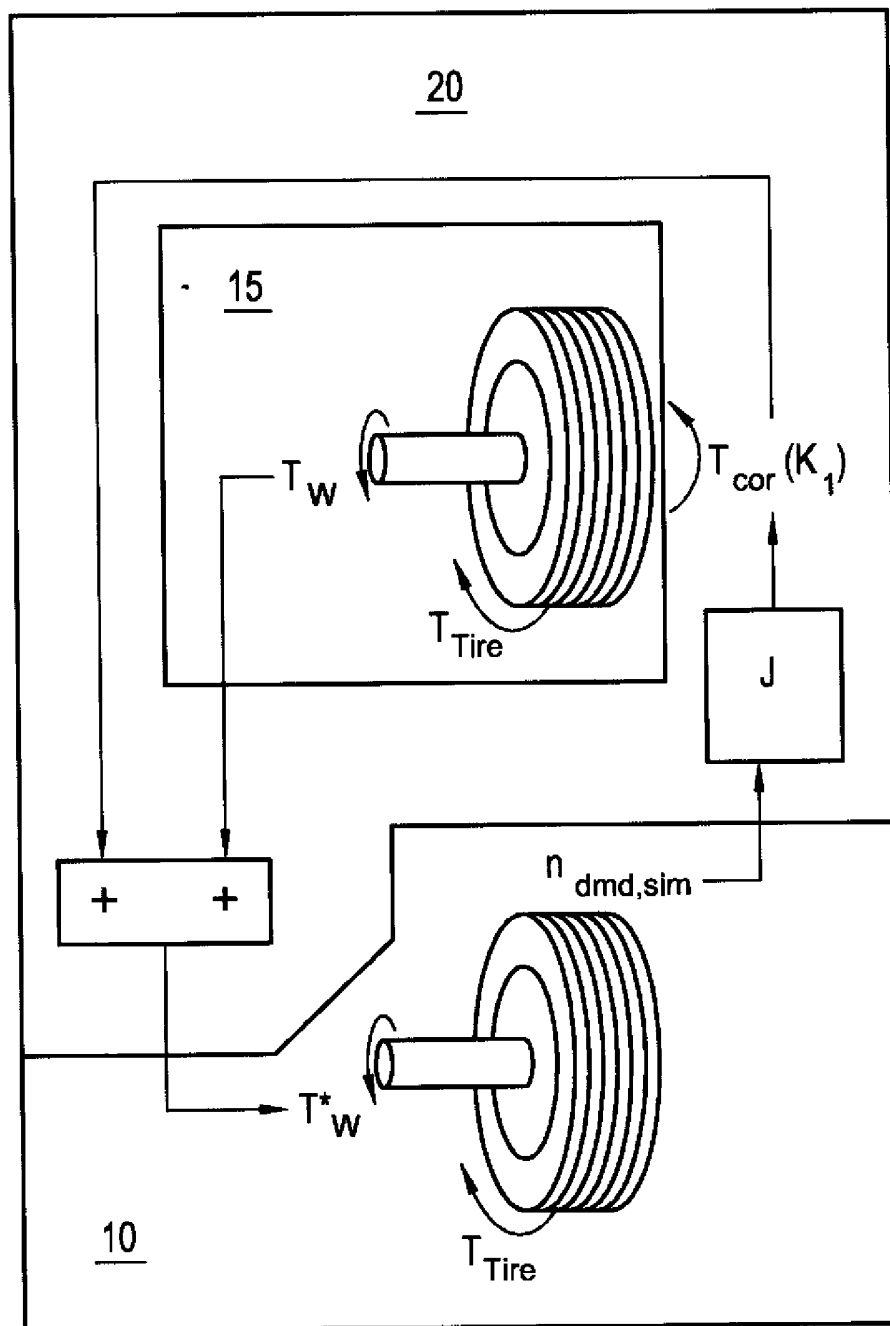


Fig. 4