

STABILISIERUNG MAGNETISCH GELAGERTER ROTOREN MIT GROSSEM GYROSKOPISCHEN EFFEKT

M. Hutterer, D. Wimmer, M. Schrödl

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

TU Wien

Gußhausstraße 25

1040 Wien, Austria

Tel.: +4358801370237

Email: markus.hutterer@tuwien.ac.at

Kurzfassung

Dieser Beitrag stellt Regelungsstrategien magnetisch gelagerter Rotoren mit großem gyroskopischen Effekt vor. Es werden zwei unterschiedliche Verfahren zur Stabilisierung entwickelt. Die erste Methode basiert auf der inversen Dynamik des Systems und verwendet einen Kalmanfilter zur Schätzung der Zustände. Die zweite Methode erweitert eine diagonale PID-Regelung mit zusätzlichen Pfaden zur Stabilisierung der Nutation- und der Präzessionsbewegungen (NP-Regelung). Bei der Regelung mit Hilfe der inversen Dynamik werden die Effekte von verkoppelten Steifigkeiten analysiert, welche die Basis für die NP-Regelung legen. Beide Strategien werden durch experimentelle Ergebnisse verifiziert.

1 Einleitung

Steigende Rotordrehzahlen und größer werdende Rotoren ergeben immer anspruchsvollere Herausforderungen an die Regelung aktiver Magnetlager (engl. Active Magnetic Bearing, AMB). Im Gegensatz zu einer passiven Stabilisierung sind aktive Magnetlager ohne Rückkopplung instabile Systeme. Die Regelung solcher Systeme benötigt abhängig von der Rotorgeometrie und dem Einsatzzweck eine mehr oder weniger komplexe Regelung. Die Anforderung an die Robustheit solcher Systeme überwiegt in vielen Anwendungen den Forderungen des dynamischen Führungsverhaltens. Um diese Robustheitseigenschaften zu standardisieren, wurde die ISO 14839-3 eingeführt. Diese Norm gibt dem Regelkreis ein klar definiertes Maximum der Sensitivitätsfunktionen. Rotoren mit großem gyroskopischen Effekt zeichnen sich durch ein stark drehzahlabhängiges Verhalten aus. Die Stabilisierung und die Erfüllung der Robustheitseigenschaften sind daher mit linearen und zeitunabhängigen (engl.

Linear Time-Invariant, LTI) Reglern nur schwer zu erfüllen. Aus diesem Grund werden in dieser Publikation zwei Regelungsstrategien zur Stabilisierung und zur Erfüllung der Robustheitsanforderungen vorgestellt.

Die einfachste und intuitivste Art der Regelung von AMBs stellt die sogenannte dezentrale Regelung dar [1], wobei jeder Sensor auf dem im zugehörigen Aktor rückgekoppelt wird. Aus dieser einfachen Rückkopplung resultieren oftmals unerwünschte Kopplungsterme der translatorischen und der rotatorischen Bewegungen. Eine Erweiterung wird durch die sogenannte entkoppelte Regelung in [2] beschrieben. Hierbei wird durch die Einführung von einer Ein- und einer Ausgangstransformation die translatorische von der rotatorischen Bewegung entkoppelt. Durch diese Entkopplung wird die Reglerauslegung zwar vereinfacht, die drehzahlabhängige Kopplung der beiden rotatorischen Bewegungen aufgrund des gyroskopischen Effektes bleibt jedoch weiterhin bestehen. Um dieses Problem zu lösen wurden in [3] und [4] eine teilweise Kompensation des gyroskopischen Effektes vorgeschlagen.

Zu Beginn dieser Publikation wird die entkoppelte Regelung nach [4] näher untersucht. Es wird sich zeigen, dass es zu Problemen im Falle eines Fanglagerkontaktes kommen kann.

Aus diesem Grund wird im zweiten Teil ein anderer Ansatz verfolgt, wobei der gyroskopische Effekt nicht kompensiert wird, sondern der drehzahlabhängige Term zugunsten des Systemverhaltens ausgenutzt wird.

2 Stabilisierung mittels inverser Dynamik

Ziel dieser Art der Regelung ist die Entkopplung und die Kompensation der drehzahlabhängigen Terme der Systemgleichung.

Die Systemgleichung der radialen Bewegung eines magnetisch stabilisierten starren Rotors kann nach [2] wie folgt angegeben werden.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{G}(\omega)\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{BK}_s\mathbf{B}^T\mathbf{x} = \mathbf{BK}_i\mathbf{i} \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}$$

Mit der Massenmatrix \mathbf{M} , der Matrix des gyrokopischen Effekts $\mathbf{G}(\omega)$, der Eingangstransformation \mathbf{B} , der Ausgangstransformation \mathbf{C} , dem Stromvektor \mathbf{i} und den Freiheitsgraden des starren Rotors \mathbf{x} .

Um die translatorischen und die rotatorischen Bewegungen näherungsweise zu entkoppeln, wird eine Eingangstransformation \mathbf{T}_{in} und eine Ausgangstransformation \mathbf{T}_{out} mit

$$\mathbf{T}_{in} = \mathbf{C}^{-1} \quad \mathbf{T}_{out} = (\mathbf{BK}_i)^{-1} \quad (2)$$

eingeführt. Durch diese Art der statischen Entkopplung wird zwar die rotatorische von der translatorischen Bewegung näherungsweise entkoppelt, die drehzahlvariante Kopplung der rotatorischen Freiheitsgrade bleibt jedoch bestehen. Abb. 1 zeigt in diesem Zusammenhang eine mögliche Destabilisierung des Rotors für hohe Drehzahlen. Für das beispielhafte System wäre die Stabilitätsgrenze bei etwa 12000 U/min erreicht.

Der Grund für diese Destabilisierung liegt in der limitierten Bandbreite der Regelung und der steigenden Eigenfrequenz der Nutationsmode (mit der Drehzahl steigende konische Mode). Eine mögliche Lösung wäre die Nutzung der inversen Dynamik des Systems um den drehzahlabhängigen Term $\mathbf{G}(\omega)$ zu kompensieren. Mit dem Regelgesetz

$$\mathbf{i} = \mathbf{T}_{out}(\mathbf{G}(\omega)\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{BK}_s\mathbf{B}^T\mathbf{x} + \mathbf{v}) \quad (3)$$

mit dem virtuellen Eingang \mathbf{v} ist das Gesamtsystem gegeben durch

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{v} \quad (4)$$

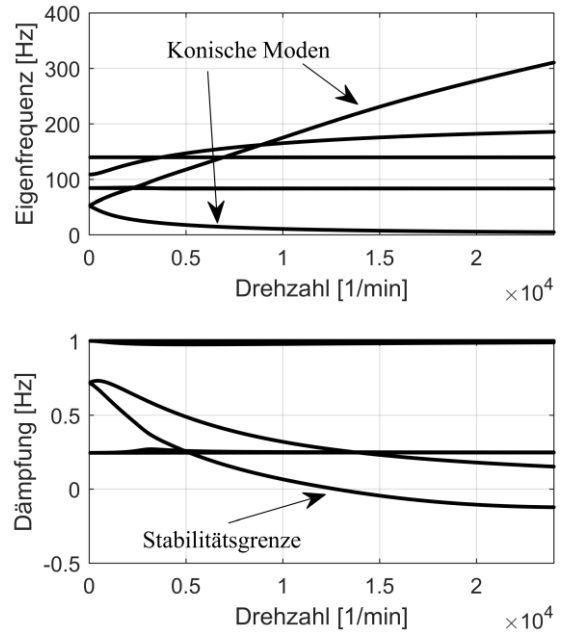


Abb. 1 Destabilisierung des nicht kompensierten Systems

Diese vollständige Entkopplung besitzt jedoch laut [5] schlechte Robustheitseigenschaften. Daher ist es vorteilhaft, durch Erweiterung von Gleichung (3) um den skalaren Faktor c_g

$$\mathbf{i} = \mathbf{T}_{out}(c_g\mathbf{G}(\omega)\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{BK}_s\mathbf{B}^T\mathbf{x} + \mathbf{v}) \quad (5)$$

nur einen Teil von $\mathbf{G}(\omega)$ zu kompensieren. Für die meisten Magnetlageranwendungen ist eine explizite Messung der nötigen Rotorgeschwindigkeiten $\dot{\mathbf{x}}$ nicht wirtschaftlich darstellbar. Daher wird ein Kalmanfilter zur Schätzung dieser Geschwindigkeiten eingesetzt. Um Rechenzeit einzusparen, kann die Tatsache ausgenutzt werden, dass zur Kompensation des gyrokopischen Effekts nur rotatorische Geschwindigkeiten nötig sind. Wird das Kalmanfilter, wie in Abb. 2 gezeigt, für das entkoppelte System entwickelt, so kann auch das Kalmanfilter in einen rotatorischen und einen translatorischen Anteil aufgespalten werden.

Der Kalmanfilter der translatorischen Bewegungen wird anschließend bei der Implementierung nicht berücksichtigt. Abb. 3 zeigt simulierte Transferfunktionen der Ausgangsensitivität der rotatorischen Bewegungen.

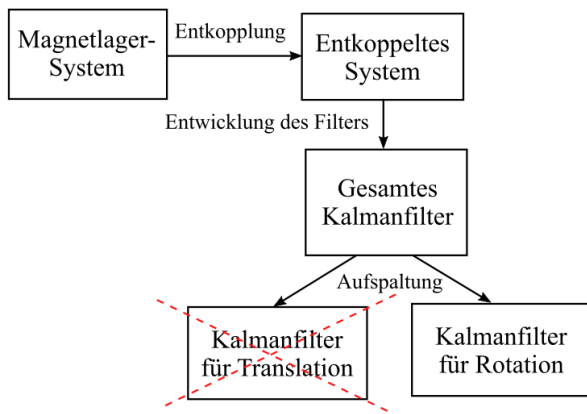


Abb. 2 Entkopplung des Kalmanfilters

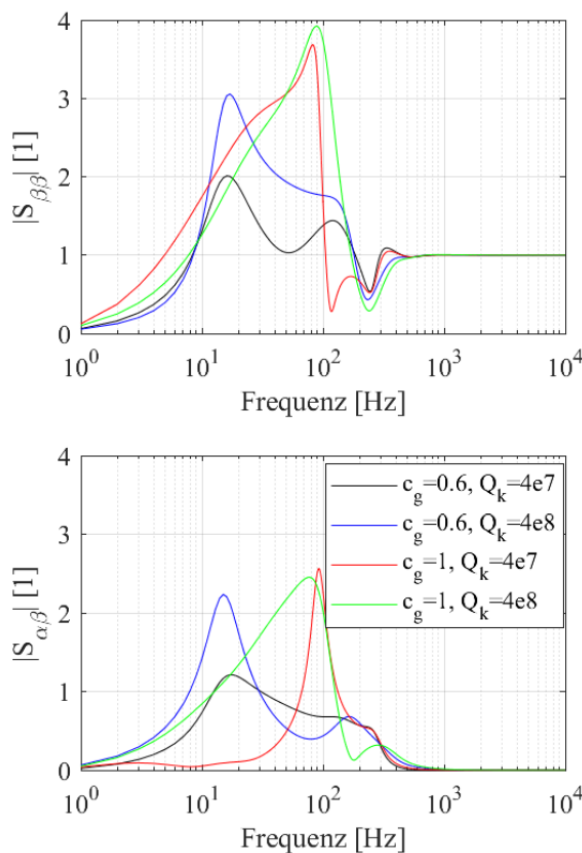


Abb. 3 Simulierte Sensitivitätsfunktionen der rotatorischen Bewegungen

Laut ISO 14839-3 sollte der Spitzenwert kleiner als 3 sein, um eine ausreichend robustes Verhalten zu gewährleisten. Man kann erkennen, dass eine Verkleinerung des Faktors c_g zu einer Verkleinerung der Sensitivität des Systems führt. Der Wert von c_g darf jedoch nicht zu klein gewählt werden, da das System ansonsten wie in Abb. 1 instabil werden könnte. Für ein ausreichend robustes Verhalten ist auch die

Gewichtung des Kalmanfilter von Bedeutung. Q_k beschreibt dabei die Gewichtung der Prozessstörung. Durch die Höhe von Q_k kann eingestellt werden ob mehr dem Modell oder mehr den Sensorwerten vertraut wird.

Abb. 4 zeigt rotatorische Sensitivitätsfunktionen, welche unter der Annahme falscher Rotordrehzahlen ω simuliert wurden.

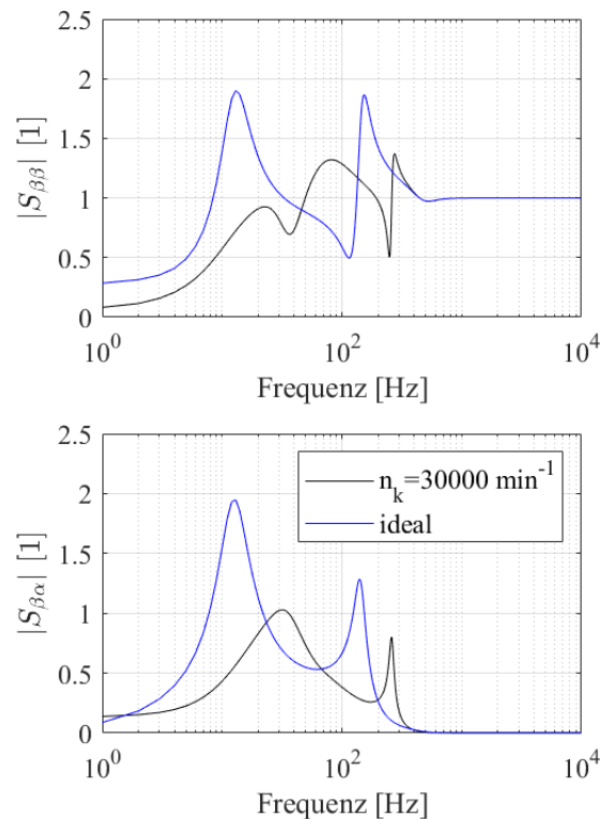


Abb. 4 Einfluss von Drehzahlfehlern auf die Ausgangsensitivität des Systems

Die blaue Funktion beschreibt dabei die simulierten Ergebnisse einer „idealen“ Reduktion des gyroskopischen Effekts durch eine „exakte Kenntnis“ von $\dot{\mathbf{x}}$. Man erkennt dabei einen bemerkenswerten Effekt. Die Kompensation mit den geschätzten Geschwindigkeiten des Kalmanfilters unter der Annahme einer falschen Information von ω besitzt eine weitaus kleiner Sensitivität als die Kompensation unter Zuhilfenahme einer „idealen Messung“ von $\dot{\mathbf{x}}$. Der Grund für dieses Verhalten ist nach [4] in resultierenden Quersteifigkeiten aufgrund der Schätzfehler begründet. Welcher Drehzahlfehler zu einer Verbesserung der Sensitivitätseigenschaften führt, muss jedoch für jedes System durch eine mehr oder weniger komplexe

Analyse erfolgen. Unter dem Begriff der Quersteifigkeit k_q wird in diesem Beitrag eine proportionale Verkopplung der beiden rotatorischen Freiheitsgrade (α , β) in der Form

$$\begin{aligned} M_\alpha &= -k_q \beta \\ M_\beta &= k_q \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

verstanden. M_α und M_β beschreiben dabei die zugehörigen Drehmomente. Abb. 5 zeigt die Dämpfungseigenschaften einer Quersteifigkeit k_q der rotatorischen Eigenschwingungen.

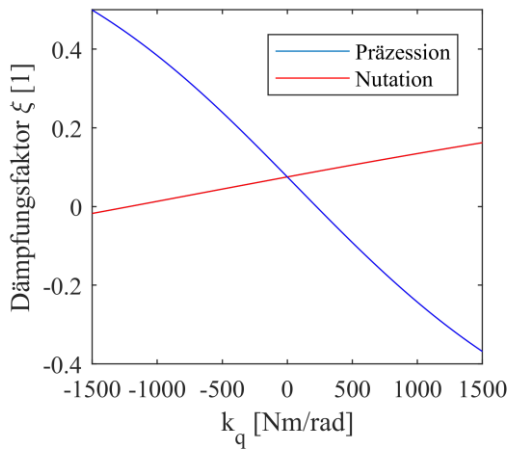


Abb. 5 Einfluss der Quersteifigkeiten auf die Dämpfung der rotatorischen Eigenbewegungen

Man kann erkennen, dass ein positives k_q dämpfend auf die Nutationsmode wirkt, jedoch destabilisierend auf die Präzessionsmode. Um ein dämpfendes Verhalten auf beide Moden zu erhalten, müsste k_q also frequenzabhängig sein. Unter der Ausnutzung der in diesem Abschnitt beschriebenen Effekten, ist es möglich eine Regelung auszulegen, welche ein ausreichend robustes Systemverhalten aufweist.

Die vorgestellten Analysen betrachten jedoch nur ein vereinfachtes LTI System unter Vernachlässigung eines möglichen Fanglagerkontaktes. Im Falle eines Fanglagerkontaktes kann das Kalmanfilter die zur Kompensation benötigten Geschwindigkeiten aufgrund der Strukturschaltung nicht mehr richtig schätzen und das System wird abhängig vom Parameter Q_k instabil. Diese Tatsache schränkt die Nutzung dieser Art der Regelung für gewisse Anwendung ein, da die Wahl von Q_k oft gewissen Einschränkungen unterliegt (z.B. flexible Eigenschaften).

3 Stabilisierung mittels NP-Regelung

Ein anderer Ansatz der Regelung von Rotoren mit hoher Drehzahlabhängigkeit wäre die direkte Ausnutzung der stabilisierenden Wirkungen der Quersteifigkeiten k_q . Wie schon im vorhergehenden Kapitel erwähnt, benötigen die Stabilisierung der Nutations- und der Präzessionsbewegungen unterschiedliche Vorzeichen der Quersteifigkeit. Zum Einführen einer frequenzabhängigen Quersteifigkeit ist deshalb ein gewisser Frequenzabstand zwischen den Eigenfrequenzen beider Bewegungen nötig. Im Vergleich zur Kompensation des gyroskopischen Effekts wird bei dieser Art der Regelung die Aufspaltung der beiden Eigenfrequenzen gezielt ausgenutzt. Abb. 6 zeigt die Struktur der NP-Regelung, welche parallel zur diagonalen PID-Regelung eingesetzt wird.

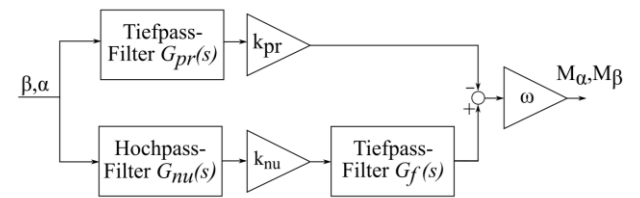


Abb. 6 Blockschaltbild der NP-Regelung

Der Tiefpassfilter $G_{pr}(s)$ und der Hochpassfilter $G_{nu}(s)$ dienen zur Aufteilung der Nutation und der Präzessionsbewegung in zwei Zweige. Dadurch können beide Bewegungen mit unterschiedlichen Phasenverschiebung stabilisiert werden. Der zusätzliche Tiefpassfilter $G_f(s)$ dient zur Begrenzung der Verstärkung im höheren Frequenzbereich. Die Übertragungsfunktion der NP-Regelung lautet:

$$C_{NP}(s) = \frac{k_{nu}\omega s}{k_{fn}\omega} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{k_{fn}\omega} \cdot \frac{s^2}{\omega_f^2} + \frac{2\xi s}{\omega_f} + 1} - \frac{k_{pr}\omega}{1 + \frac{s}{\omega_{pr}}} \quad (7)$$

Wobei $k_{fn}\omega$ die drehzahlabhängige Grenzfrequenz des Hochpasses, ω_f die Grenzfrequenz des Tiefpasses G_f und ω_{pr} die Grenzfrequenz

des Tiefpasses G_{pr} beschreibt. Die NP-Regelung lautet somit

$$\begin{aligned} M_\alpha &= -C_{NP}(s)\beta \\ M_\beta &= C_{NP}(s)\alpha \end{aligned} \quad (8)$$

Zur Berechnung der Parameter der Reglerstruktur wird in dieser Arbeit die H_∞ -Methode nach [6] verwendet. Ziel dieser Optimierung ist die Minimierung des größten Singulärwertes σ_{max} der Sensitivitätsmatrix des geschlossenen Regelkreises. σ_{max} beschreibt die größtmögliche Verstärkung der Sensitivitätsmatrix und definiert daher eine strengere Bedingung als die ISO 14839-3.

4 Experimentelle Ergebnisse

Um die Performance der entwickelten Regelungen nachzuweisen, werden in diesem Abschnitt gemessene Sensitivitätsfunktionen betrachtet. Abb. 7 zeigt die gemessene Sensitivitätsfunktion unter der Nutzung der inversen Dynamik. Man kann erkennen, dass sowohl die direkte Sensitivität $S_{\beta\beta}$ als auch die verkoppelte Sensitivität $S_{\beta\alpha}$ weit unter der Grenze von drei liegt. Diese Tatsache weist ein robustes Verhalten im Normalbetrieb der magnetischen Lagerung nach. Die Spitze bei ca. 400 Hz ist in der Unwucht des Rotors begründet und wird daher aus der Analyse ausgenommen. Abb. 8 zeigt die gemessene Sensitivitätsfunktion der translatorischen Bewegung. Wie auch bei der rotatorischen Bewegung liegt die gesamte Funktion unter der Grenze von 3. Aus den betrachteten experimentellen Ergebnissen könnte auf eine ausreichend gute Performance der inversen Dynamik geschlossen werden.

Die betrachteten Analysen berücksichtigen jedoch nur das lineare Verhalten der magnetischen Lagerung. Experimente haben jedoch gezeigt, dass die Restabilisierung eines Fanglagerkontaktes mit dieser Art der Regelung nur schwer möglich ist.

Die folgenden Experimente dienen daher zur Analyse der Eigenschaften der NP-Regelung. Abb. 9 zeigt die Spitzenwerte verschiedener Sensitivitätsfunktionen S_p abhängig von der Drehfrequenz des Rotors f_ω .

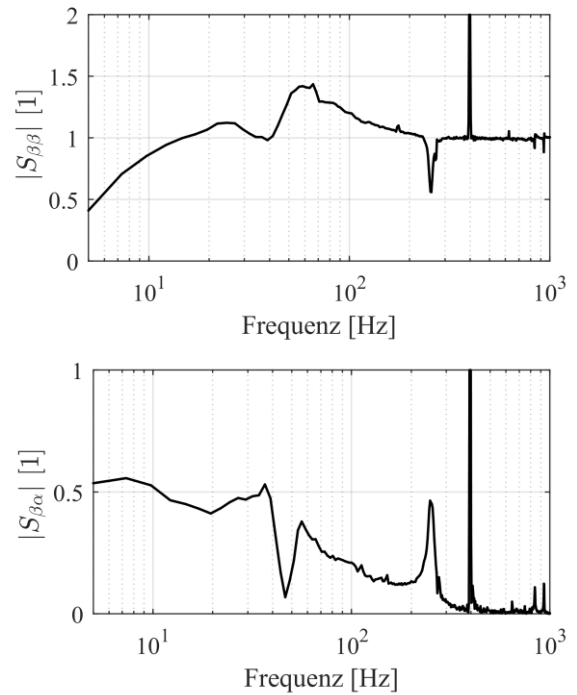


Abb. 7 Sensitivitätsfunktionen der rotatorischen Bewegung bei einer Drehzahl von 24000 U/min (inverse Dynamik)

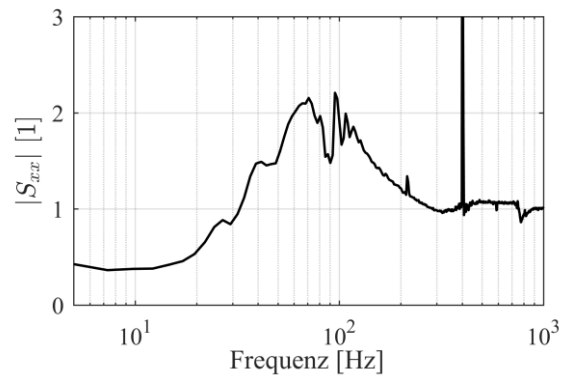


Abb. 8 Sensitivitätsfunktionen der translatorischen Bewegung bei einer Drehzahl von 24000 U/min (inverse Dynamik)

Die translatorische Sensitivität ist näherungsweise unabhängig von f_ω , was die entkoppelnde Eigenschaft der Ein- und Ausgangstransformation nachweist. Die rotatorische Sensitivität ist abhängig von f_ω und verringert sich anfangs. Die Erhöhung bei etwas über 200 Hz ist in der schwächer werdenden Dämpfung der Nutationsmode aufgrund der Bandbreite der Regelung begründet. Im oberen Bereich von f_ω

wird die stabilisierende Wirkung des gyroskopischen Effektes ausgenutzt und dadurch sinkt S_p wieder.

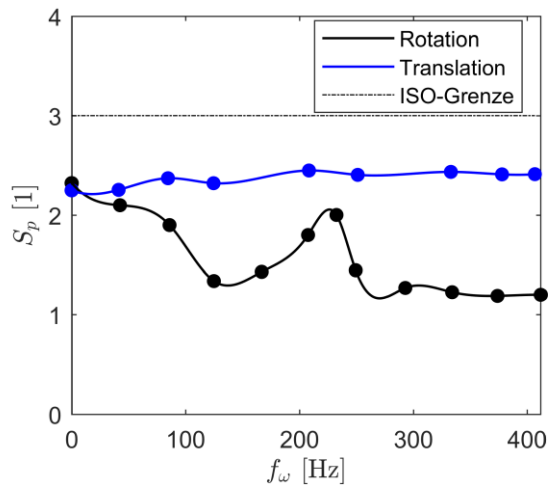


Abb. 9 Drehzahlabhängige Sensivitätsspitzen S_p der NP-Regelung

Die NP-Regelung zeigt im ganzen Drehzahlreich eine ausreichende Performance. Im Falle eines Fanglagerkontaktes kann sich das System mit Hilfe der NP-Regelung auch schnell wieder restabilisieren, wie Abb. 10 zeigt. Bei diesem Experiment wurde von 0.1 s-0.2 s ein gewisser Strom an den Aktor gelegt um einen Fanglagerkontakt zu verursachen.

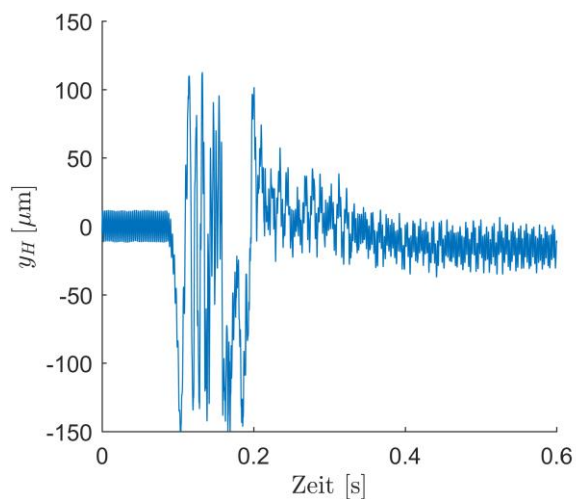


Abb. 10 Verhalten bei Fanglagerkontakt

5 Zusammenfassung

Diese Publikation beschreibt die Regelung eines magnetisch gelagerten Rotors mit einem

hohen gyroskopischen Effekt. Zu Beginn wurde die Problematik einer einfachen dezentralen Regelung erörtert. Basierend auf den Erkenntnissen wurde eine Regelung basierend auf der Methode der inversen Dynamik entwickelt und auf Performance und Robustheit untersucht. Die Untersuchungen des linearen Verhaltens zeigte gute Ergebnisse. Im Falle eines Fanglagerkontaktes kann sich das System jedoch nur schwer wieder restabilisieren. In einem weiteren Schritt wurde daher eine Regelung (NP-Regelung) entwickelt, welche den gyroskopischen Effekt nicht kompensiert, sondern die Kopplungen gezielt ausnutzt. Die NP-Regelung zeigt eine gute Performance und Robustheit des geschlossenen Regelkreises. Mithilfe der NP-Regelung konnten auch Fanglagerkontakte erfolgreich restabilisiert werden.

References

- [1] Bleuler, H.: Decentralized Control of Magnetic Rotor Bearing Systems. PhD-thesis, ETH Zürich, 1984
- [2] Schweitzer, G, Maslen, E.: Magnetic Bearings: Theory, Design, and Applications, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [3] Hutterer, M., Schrödl, M.: Control of a Flexible Magnetic Levitated Rotor using the Computed Torque Method in Combination with Stabilizing Filters, Proceedings of the IEEE Conference on Advanced Intelligent Mecatronics, 2016
- [4] Hutterer, M.: Regelung von magnetgelagerten Rotoren für den Einsatz in Turbomolekularpumpen, Dissertation, TU Wien 2018
- [5] Ahrens, M., Kucera, L., Larsonneur, R.: Performance of Magnetically Suspended Flywheel Energy Storage Device, IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol.4, 1996
- [6] Apkari, P., Bompart, V., Noll, D.: Non-smooth structured control design with application to PID loop-shaping of a process, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol.17, 2007