



Doctoral Thesis

Individual cylinder air-fuel ratio control

Author(s):

Schick, Wolfgang

Publication Date:

2011

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006361323> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 19386

INDIVIDUAL CYLINDER AIR-FUEL RATIO CONTROL

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
Wolfgang Schick

MSc ETH in Mechanical Engineering
born December 25, 1976
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Lino Guzzella, examiner
Prof. Lars Eriksson, co-examiner
Manfred Birk, co-examiner

2011

Abstract

The thesis presents a complete framework for the design of an individual cylinder air-fuel ratio (A/F) controller that aims to further reduce the exhaust emissions of modern automotive gasoline engines. It is well known that this type of controller relies on a correct estimation of the A/F of the individual cylinders. Otherwise, the control system can become unstable. Therefore, the conditions for its stability and robustness are studied in detail and the results are then used to improve the robustness of the controller.

A control-oriented algebraic model is formulated in the frequency domain and a Fourier analysis of the A/F sensor signal is incorporated. The observability of the individual cylinders is evaluated analytically with the condition number and graphically with polar diagrams. The structure of the model and the computation of the Fourier coefficients using the Discrete Fourier Transform (DFT) lead to a periodic time-varying linear control system which is transformed by usage of the lifting technique to a linear time-invariant (LTI) system with an increased number of input and output signals. The lifted system allows to discuss the stability with tools available for LTI systems, specifically eigenvalue analysis and robustness analysis using a modeled uncertainty. In a first approach, the robustness is investigated using Monte-Carlo simulations. As a result, the domain of robust operation is defined by two newly introduced metrics. In a second approach, two uncertainty models of different complexity are incorporated for a discussion of robustness using the scaled small gain theorem.

An engine test bench is available to validate the model, the controller, and the robustness of the control system. The controller has been successfully tested under the transient conditions of the federal test procedure (FTP) and criteria for robust operation have been developed. The robustness can be increased if changes in the operating point, the ambient air pressure, and the exhaust gas temperature are compensated. Further, in dependence of the number of cylinders on one engine bank, degrees of

freedom exist in the design of the estimator as a part of the controller. In this case, the robustness increases if all additional, redundant information in the A/F sensor signal is evaluated for the estimation.

Zusammenfassung

Diese Dissertation stellt ein vollständiges Konzept zur Auslegung eines zylinderindividuellen Reglers für das Verhältnis von Luft zu Kraftstoff (A/F) vor mit dem Ziel, die Schadstoffemissionen moderner Benzinmotoren von Personenwagen zu reduzieren. Es ist bekannt, dass dieser Typ Regler eine exakte Schätzung des A/F erfordert, um die Stabilität des Regelsystems zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden die Bedingungen für den stabilen Betrieb im Detail untersucht und die daraus resultierenden Erkenntnisse zur Verbesserung der Robustheit des Reglers herangezogen.

Ein algebraisches Modell für die Regelung wird im Frequenzbereich formuliert und das A/F Sensorsignal wird mittels Fourieranalyse transformiert. Die Beobachtbarkeit der einzelnen Zylinder wird analytisch mit Hilfe der Konditionszahl und grafisch mittels Polardiagrammen bewertet. Die Struktur des Modells und die Art der Berechnung der Fourierkoeffizienten mittels diskreter Fouriertransformation (DFT) führen zu einem periodisch-zeitvariablen System, das unter Verwendung der Lifting-Methode zu einem linearen zeitinvarianten (LTI) System mit einer höheren Anzahl von Ein- und Ausgangssignalen transformiert wird. Anhand des gelifteten Systems kann die Stabilität des Regelkreises mit Methoden für LTI Systeme untersucht werden, insbesondere die Eigenwertanalyse und die Robustheitsanalyse mit Modellunsicherheiten. In einem ersten Schritt wird die Robustheit mit Monte-Carlo Simulationen untersucht mit dem Ergebnis, dass der stabile Betriebsbereich abhängig von zwei neu eingeführten Massen dargestellt werden kann. In einem zweiten Schritt werden Modelle für Unsicherheiten unterschiedlicher Komplexität verwendet, um anhand des skalierten Small-Gain-Theorems die Robustheit diskutieren zu können.

Ein Motorenprüfstand wird zur Validierung des Modells, des Reglers und der Robustheitsanalyse verwendet. Der Regler wurde erfolgreich unter den transienten Bedingungen eines Fahrzyklus' (federal test procedure-FTP) erprobt und Kriterien für den robusten Betrieb des Reglers wurden erarbeitet. Es stellte sich heraus, dass die Robustheit erhöht werden kann,

wenn Veränderungen des Betriebspunktes, des Umgebungsdruckes und der Abgastemperatur kompensiert werden. Des Weiteren ist es bei Motoren mit einer bestimmten Anzahl Zylinder auf einer Bank möglich, die Robustheit des Reglers zu erhöhen, indem redundante Information des A/F Sensorsignals zusätzlich ausgewertet wird.