

## Reihe 8

Mess-,  
Steuerungs- und  
Regelungstechnik

Nr. 1262

Dip.-Ing. Michael Pagel,  
Bad Liebenzell

## Model-based diagnosis of electric cooling fan drive systems

Berichte aus dem

Institut für  
Automatisierungstechnik  
und Mechatronik  
der TU Darmstadt





# Model-based diagnosis of electric cooling fan drive systems

Vom Fachbereich  
Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

**Dipl.-Ing. Michael Pagel**  
geboren am 13. Januar 1983 in Daun

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Rolf Isermann  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Andreas Binder

Tag der Einreichung: 13. September 2017  
Tag der mündlichen Prüfung: 05. Dezember 2017



D 17

Darmstädter Dissertationen



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 8

Mess-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik

Dip.-Ing. Michael Pagel,  
Bad Liebenzell

Nr. 1262

Model-based diagnosis  
of electric cooling fan  
drive systems

Berichte aus dem

Institut für  
Automatisierungstechnik  
und Mechatronik  
der TU Darmstadt



Pagel, Michael

## **Model-based diagnosis of electric cooling fan drive systems**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 08 Nr. 1262. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

144 Seiten, 89 Bilder, 17 Tabellen.

ISBN 978-3-18-526208-1 ISSN 0178-9546,

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

**Keywords:** Fault detection – Fault diagnosis – Engine cooling fan – Thermal network – Parameter estimation – Synchronous machine – State observer – Model-based development

Model-based diagnosis of electric cooling fan drive systems is a contribution to the field of fault detection and diagnosis for electrically driven engine cooling fans. Its main focus is on the online gathering and determination of important parameters and internal states. The developed methods for fault detection and diagnosis are characterized by resource and computing efficient design and by a low application effort, drastically reducing the costs for transferring them to other applications. Novel algorithms are presented for determination of the winding resistance, the flux linkage over angle and the equivalent series resistance. Based on these algorithms, a new and innovative approach for determination of the magnet temperature is proposed, utilizing the winding temperature, which is derived without requiring an additional temperature sensor. Furthermore, methods are presented for detection of a demagnetization event, detection of an aged DC-link capacitor and a novel approach is introduced for detection and diagnosis of unusual load conditions, caused for example, by a blockage or dirt on the fan blade.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

Pagel, Michael: Model-based diagnosis of electric cooling fan drive systems

Dissertation Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung auf TUPrints: 2018

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-80898

Tag der mündlichen Prüfung: 05. Dezember 2017

Veröffentlicht unter CC-BY-NC 4.0 International

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9546

ISBN 978-3-18-526208-1



# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand der Robert Bosch GmbH in der Voraufwicklung des Geschäftsbereichs Electrical Drives.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Rolf Isermann für die Betreuung meiner Arbeit. Durch seine beständige Unterstützung, die zahlreichen Gespräche und wertvollen Diskussionen hat er sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ich habe unsere Dialoge stets als Ermutigung und Motivation empfunden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Andreas Binder danke ich für die Betreuung als Zweitgutachter und das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse. Seine Anregungen und kritischen Kommentare waren stets hilfreich.

Herrn Dr.-Ing. Bernd Galyga danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit, für seine Unterstützung sowie für die mir gewährten wissenschaftlichen Freiräume. Besonderer Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Lucas Ginzinger, der für das letzte halbe Jahr die Betreuung meiner Arbeit übernommen hat. Allen Kollegen sei an dieser Stelle herzlich für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre, die außerordentlich gute Zusammenarbeit sowie die anregenden Diskussionen gedankt.

Großer Dank gebührt auch allen Studenten, die als Praktikanten, als Werkstudenten oder im Rahmen ihrer Abschlussarbeit Teilaspekte des Vorhabens bearbeiteten. Erwähnen möchte ich an dieser Stelle insbesondere Gerhard Decker, Philippe Kocher, Volker Kimmig und Christoph Jatzek.

Besonderer Dank gilt auch meinen Eltern, die mich auf meinem Weg durch das Studium begleitet und immer an mich geglaubt haben. Ohne ihre Unterstützung wäre ein Studium und eine anschließende Promotion nicht möglich gewesen.

Schließlich möchte ich ausdrücklich meiner Frau Marie danken, die für mich während der gesamten Zeit eine sehr große persönliche Unterstützung gewesen ist. Die Fertigstellung einer Dissertation neben der täglichen Arbeit hat starke Auswirkungen auf das Privatleben. Ohne ihre Geduld, ihre mentale Unterstützung und ihr großes Verständnis hätte ein solcher Arbeitsumfang niemals gelingen können.

Bad Liebenzell, im September 2017



# Contents

<b>List of Symbols</b>	<b>VII</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 State of the Art . . . . .	3
1.2 Thesis Structure and New Contribution . . . . .	4
<b>2 Methods of Fault Detection and Diagnosis</b>	<b>8</b>
2.1 Fault Detection . . . . .	8
2.1.1 Parity Equations . . . . .	9
2.1.2 State Observer . . . . .	10
2.1.3 Parameter Estimation . . . . .	11
2.2 Fault Diagnosis . . . . .	16
<b>3 The Engine Cooling Fan System</b>	<b>18</b>
3.1 Mathematical model of the components of an electrically driven fan . . . . .	22
3.1.1 Electrical Subsystem . . . . .	22
3.1.2 Electromagnetic Subsystem . . . . .	23
3.1.3 Mechanical Subsystem . . . . .	26
3.1.4 Air Pathway in the Engine Compartment . . . . .	28
3.1.5 Validation of the Simulation Model . . . . .	34
3.2 Test Bench . . . . .	35
3.3 Conclusion . . . . .	38
<b>4 Fault Detection and Diagnosis of the electrical motor: Online Parameter Acquisition</b>	<b>40</b>
4.1 Winding Resistance . . . . .	40
4.1.1 DC Injection Method . . . . .	41
4.1.2 Implementation and Results . . . . .	48
4.1.3 Conclusion . . . . .	51
4.2 Flux Linkage over Angle . . . . .	53
4.2.1 Proposed Method . . . . .	55
4.2.2 Implementation . . . . .	59
4.2.3 Results . . . . .	62
4.2.4 Conclusion . . . . .	65
4.3 Equivalent Series Resistance of the DC-Link Capacitor . . . . .	66
4.3.1 Structure and Degradation Mechanism of the Electrolytic Capacitor . . . . .	66
4.3.2 Proposed method . . . . .	69
4.3.3 Implementation and Results . . . . .	74
4.3.4 Conclusion . . . . .	77
4.4 Thermal Network for Determination of Magnet Temperature . . . . .	78

4.4.1	Airflow Through the Engine Cooling Fan . . . . .	78
4.4.2	Thermal Modeling of Electrical Machines . . . . .	80
4.4.3	MIMO Model with Observer Structure . . . . .	82
4.4.4	Results . . . . .	89
4.4.5	Conclusion . . . . .	96
4.5	Summary . . . . .	97
<b>5</b>	<b>Fault Detection and Diagnosis: Application</b>	<b>99</b>
5.1	Electrical Subsystem . . . . .	100
5.1.1	Principle of Operation . . . . .	100
5.1.2	Results . . . . .	101
5.2	Electromagnetic Subsystem . . . . .	101
5.2.1	Principle of Operation . . . . .	102
5.2.2	Results . . . . .	105
5.3	Thermal Subsystem . . . . .	105
5.4	Mechanical Subsystem . . . . .	107
5.4.1	Principle of Procedure . . . . .	107
5.4.2	Results . . . . .	112
5.5	Required Cycle Time at EoL . . . . .	113
5.6	Conclusion . . . . .	115
<b>6</b>	<b>Summary and Outlook</b>	<b>118</b>
	<b>Appendices</b>	<b>122</b>
<b>A</b>	<b>The Condition of a Matrix</b>	<b>123</b>
<b>B</b>	<b>Star-Delta-Transformation</b>	<b>124</b>
<b>C</b>	<b>State Variable Filter</b>	<b>125</b>
<b>D</b>	<b>Datasheet Parameters of Selected Test Bench Components</b>	<b>126</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>127</b>

# List of Symbols

Symbol	Description	Unit
$A$	(cross sectional) area	$\text{m}^2$
$\mathbf{A}$	Dynamic matrix	-
$\mathbf{B}$	Input matrix	-
$\mathbf{C}$	Output matrix	-
$c$	Specific heat capacity	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$C$	Capacity	$\text{A s V}^{-1}$
$\mathbf{D}$	Feedthrough matrix	-
$E$	Energy	J
$i$	Electrical current	A
$I$	DC current	A
$f$	Frequency	Hz
$f_u, f_y$	Additive faults	-
$F$	Transfer function	-
$J$	Inertia	$\text{kg m}^{-1}$
$k_{\text{fr}}$	Friction coefficient	-
$K$	Gain	-
$L$	Inductance	$\text{V s A}^{-1}$
$m$	Mass	kg
$\dot{m}$	Mass flow rate	$\text{kg s}^{-1}$
$M$	Torque	N m
$n$	Process noise	-
	Rotational speed	$\text{min}^{-1}$
$P$	Power (loss)	W
$\mathbf{P}$	Covariance matrix	-
$p$	Pressure	Pa
$\dot{Q}$	Heat flow	$\text{J s}^{-1}$
$r$	Residual	-
$R$	Electrical resistance	$\text{V A}^{-1}$
$\mathbf{S}$	Upper triangular matrix	-
$s$	Laplace operator	$\text{s}^{-1}$
	System poles	-
$T$	Time constant	s
	Temperature difference	K
$\mathbf{T}$	Transformation matrix	-
$u$	Voltage	V
$u_i$	Induction voltage	V
$U$	DC voltage	V
$v$	Velocity	$\text{m s}^{-1}$

Symbol	Description	Unit
$V$	Cost function	-
$\dot{W}$	Heat capacity flow	$\text{J s}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\mathbf{x}$	State vector	-
$y$	Output signal	-
$z$	$z$ operator	-
$\alpha$	Heat transfer coefficient	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-2}$
$\gamma$	Temperature coefficient	$\text{K}^{-1}$
$\delta$	Condition number	-
$\vartheta$	Temperature	$^{\circ}\text{C}$
$\Theta$	Parameter vector	-
$\kappa$	Eigenvalue	-
$\lambda$	Forgetting factor	-
$\rho$	Density	$\text{kg m}^{-3}$
$\sigma$	Singular value	-
$\varphi$	Rotor angle	rad
$\xi$	Duty cycle	-
$\Psi$	Flux linkage	V s
$\Psi$	Data matrix	-
$\omega$	Angular velocity	$\text{rad s}^{-1}$

---

## Subscripts

AG	Airgap
bat	battery
br	bridge
c	cooler
cab	cable
cf	coolant fluid
cm	car manufacturer
d	dynamic
dc	intermediate circuit
el	electrical
ESR	equivalent series resistance
f	fan
fr	friction
hys	hysteresis
ind	induced
inj	injection
j	junction
l	losses
mag	magnet
mot	motor
res	resulting
rot	rotor
r	resistance
rms	root mean square
R	Rotor
s	sampling time
sp	supplier plant
st	static
sw	switching
S	Stator
vn	vehicle net
0	reference value

## Abbreviations

A/D	Analog-to-Digital
AC	Alternating current
DC	Direct current
DF	Dissipation factor
CAN	Control Area Network
CFD	Computational Flow Dynamics
DSFI	Discrete Square Root Filtering
DSP	Digital Signal Processor
EC	Electronically Commutated
ECU	Electronics Control Unit
ESR	Equivalent Series Resistance
ETD	Entry Temperature Difference
EOI	End-of-Line
FEM	Finite Element Method
FFT	Fast-Fourier-Transform
LS	Least Squares
LUT	Look-up-table
MIMO	Multi-Input-Multi-Output
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor
OEM	Original Equipment Manufacturer
PCB	Printed Circuit Board
PRBS	Pseudo Random Binary Sequence
PMSM	Permanent-Magnet Synchronous Motor
SISO	Single-Input-Single-Output