Berichte aus der Automatisierungstechnik

Konstantin Machleidt

Preventive maintenance of Safety-related Systems – modeling, analysis, and optimization

Präventive Instandhaltung sicherheitsbezogener Systeme – Modellierung, Analyse und Optimierung

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2015

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4151-4
ISSN 0945-4659

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Preventive maintenance of Safety-related Systems – modeling, analysis, and optimization

Präventive Instandhaltung sicherheitsbezogener Systeme – Modellierung, Analyse und Optimierung

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Konstantin Machleidt
geb. in Nowosibirsk

D 386

Datum der mündlichen Prüfung:	30.10.2015
Dekan des Fachbereichs:	Prof. Dr.-Ing. Hans D. Schotten
Promotionskommision	
Vorsitzender:	Prof. Dr. techn. Gerhard Fohler Technische Universität Kaiserslautern
Berichterstattende:	Prof. Dr.-Ing. habil. Ping Zhang Technische Universität Kaiserslautern
	Prof. Dr.-Ing. Frank Schiller Beckhoff Automation GmbH & Co. KG und East China University of Science and Technology

Abstract: Safety-related Systems (SRS) protect from the unacceptable risk resulting from failures of technical systems. The average probability of dangerous failure on demand (PFD) of these SRS in low demand mode is limited by standards. Probabilistic models are applied to determine the average PFD and verify the specified limits. In this thesis an effective framework for probabilistic modeling of complex SRS is provided. This framework enables to compute the average, instantaneous, and maximum PFD. In SRS, preventive maintenance (PM) is essential to achieve an average PFD in compliance with specified limits. PM intends to reveal dangerous undetected failures and provides repair if necessary. The introduced framework pays special attention to the precise and detailed modeling of PM. Multiple so far neglected degrees of freedom of the PM are considered, such as two types of elementwise PM at arbitrarily variable times. As shown by analyses, these degrees of freedom have a significant impact on the average, instantaneous, and maximum PFD. The PM is optimized to improve the average or maximum PFD or both. A well-known heuristic nonlinear optimization method (Nelder-Mead method) is applied to minimize the average or maximum PFD or a weighted trade-off. A significant improvement of the objectives and an improved protection are achieved. These improvements are achieved via the available degrees of freedom of the PM and without additional effort. Moreover, a set of rules is presented to decide for a given SRS if significant improvements will be achieved by optimization of the PM. These rules are based on the well-known characteristics of the SRS, e.g. redundancy or no redundancy, complete or incomplete coverage of PM. The presented rules aim to support the decision whether the optimization is advantageous for a given SRS and if it should be applied or not.

Zusammenfassung: Sicherheitsbezogene Systeme (SRS) schützen vor unverhälnismäßigen Gefährdungen, die durch Ausfälle technischer Einrichtungen verursacht werden. Die mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls bei Anforderung (PFD) für die SRS mit niedriger Anforderungsart wird durch Normen begrenzt. Um die mittlere PFD zu ermitteln und die durch Normen vorgeschriebenen Grenzwerte zu verifizieren, werden probabilistische Modelle verwendet. In dieser Dissertation wird eine neue Methode zur probabilistischen Modellierung komplexer SRS entwickelt, mit der die Kenngrößen mittlere, instantane und maximale PFD ermittelt werden können. Für SRS ist die präventive Instandhaltung (PM) unentbehrlich, damit die mittlere PFD die vorgeschriebenen Grenzwerte nicht überschreitet. Durch PM werden die gefahrbringenden unerkannten Ausfälle aufgedeckt und falls erforderlich repariert. Bei der entwickelten Methode wird ein besonderes Augenmerk auf die präzise und detaillierte Modellierung der PM gelegt. Es werden mehrere bisher vernachlässigte Freiheitsgrade der PM berücksichtigt, wie z.B. für jedes Element zwei Typen der PM, jeweils zu beliebigen variablen Zeiten. Wie in Analysen gezeigt wird, haben diese Freiheitsgrade einen signifikanten Einfluss auf die Kenngrößen. Um eine Verbesserung der mittleren oder maximalen PFD oder von beiden

zu erzielen, wird die PM optimiert. Mittels eines Verfahrens der heuristischen nichtlinearen Optimierung (Nelder-Mead-Verfahren) werden die mittlere oder maximale PFD oder eine gewichtete zusammengesetzte Zielfunktion minimiert. Es werden signifikante Verbesserungen der Optimierungsziele und ein besserer Schutz vor Gefährdungen erreicht. Diese Verbesserungen werden mittels verfügbarer Freiheitsgrade der PM erzielt und erfordern keinen Mehraufwand. Zusätzlich werden Regeln bereitgestellt, um abzuschätzen ob für ein SRS signifikante Verbesserungen durch die Optimierung erzielt werden können. Diese Regeln basieren auf den bekannten Merkmalen des SRS, wie z.B. Redundanz oder keine Redundanz, vollständige oder unvollständige Abdeckung der PM. Damit lässt es sich abschätzen, ob der Einsatz der beschriebenen Optimierungsmethoden für ein SRS vorteilhaft sein kann.

Acknowledgments

The work that resulted in this book could not have been accomplished without several persons' assistance, support, and encouragement.

First of all, I would like to thank my doctoral adviser, Professor Lothar Litz, for the opportunity to research and work at his institute. I am deeply grateful for his encouragement, the trust he placed in my work, and the intellectual freedom he has given to me in these years. His guidance and invaluable advice were of great importance to complete this work. The research standards he has propagated were worthy of imitation and influenced me strongly. Tragically, Professor Lothar Litz suddenly passed away this August. This book is dedicated to him.

My sincere thanks go to the members of the evaluation board: Professor Ping Zhang, Technische Universität Kaiserslautern; Professor Frank Schiller, Beckhoff Automation GmbH & Co. KG and East China University of Science and Technology; and the chairman Professor Gerhard Fohler, Technische Universität Kaiserslautern.

During my work as a research associate for the Institute of Automatic Control at the Technische Universität Kaiserslautern I had the privilege to be part of a great team. I am grateful to all my colleagues for the numerous rich and important discussions about research and other interesting topics. Thank you for your friendship, support, and humor. I deeply appreciate the time we had spent together at the institute, on our joint trips, and during the numerous activities apart from work. Many thanks to Stefan Schneider, Thomas Gabriel, Thorsten Rodner, Anna Nehring, Thomas Leifeld, André Teles-Carvalho, and Andreas Haupt for proofreading of the manuscript and hinting at a considerable number of flaws I have eliminated with your help.

During my work for the Institute of Automatic Control, I was part of several industrial projects with the companies KROHNE Messtechnik GmbH, Bayer TechnologyServices GmbH, and BASF SE. I would like to warmly thank all the people who contributed to successfully complete these projects.

My sincere thanks go to Thomas Gabriel, Daniel Düpont, and Andreas Hildebrandt for the numerous interesting and inspiring discussions on the topic of functional safety. I would like to thank Christoph Jötten for his always helpful and inspiring advice. Moreover, I would like to thank my friends and relatives for the support and encouragement they gave me during these years.

Finally, and not the least, I give the heartiest gratitude to Lucia and to my parents for their love, patience, encouragement, and help.

Kaiserslautern, December 2015 Konstantin Machleidt

Contents