

Универзитет у Крагујевцу
Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву

Владимир Стојановић
Драган Пршић

Детекција и дијагноза отказа
у системима аутоматског управљања

Краљево, 2022.

Доц. др Владимир Стојановић

Проф. др Драган Пршић

**Детекција и дијагноза отказа
у системима аутоматског управљања**

Рецензенти

др Саша Продановић, ван. проф., *Машински факултет у Источном Сарајеву*
др Љубиша Дубоњић, доц., *Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву*

Статус публикације

Уџбеник

Издавач

Универзитет у Крагујевцу
Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву,
Доситејева 19, 36000 Краљево

За издавача

Проф. др Миле Савковић, декан

Дизајн корица

Бојан Белоица, дипл. инж.

Техничка обрада

Владимир Стојановић, Владимир Ђорђевић

Одобрено за штампу

Одлуком Наставно-научног већа ФМГ Краљево,
број 267/6 од 27. 04. 2022. год.

Штампа

SaTCIP, Читлук

Тираж

50 примерака

ISBN: 978-86-81412-16-9

Предговор

Чињеница је да су сви системи и процеси у реалном свету подложни грешкама, отказима, кваровима, и уопштено говорећи, неочекиваним начинима понашања. Ово објашњава зашто постоји стална потреба за поузданим и универзалним системима управљања који су толерантни на отказе као и ефикасним стратегијама детекције и дијагнозе отказа.

Ово посебно важи за инжењерске системе, чија сложеност перманентно расте услед неизбежног развоја модерне индустрије као и револуције информационо-комуникационих технологија. Заиста, дизајн и рад инжењерских система захтевају повећану пажњу у погледу расположивости, поузданости, безбедности и толеранције на отказе. Стога је природно да детекција и дијагноза отказа игра фундаменталну улогу у савременој теорији и пракси управљања. Ово се огледа у великом броју радова о детекцији и дијагнози отказа на многим конференцијама и часописима оријентисаним за системе аутоматског управљања. Заиста, велика количина знања о дијагнози отказа заснована на моделу акумулирана је кроз научну литературу од почетка 1970-их. Као резултат тога, развијен је широк спектар техника детекције и дијагнозе отказа.

Све више суочени са захтевима безбедности, еколошке одрживости, енергетске ефикасности и профитабилности, рад инжењерских система се у великој мери ослања на система аутоматског управљања који укључују велики број актуатора и мерних сензора. Док је аутоматизација процеса кључна за постизање горе наведених захтева, све веће ослањање на актуаторе и сензоре има тенденцију да повећа рањивост процеса на отказе (на пример, дефекти/кварови у процесној опреми, сензорима и актуаторима, кварови у регулаторима или у управљачким петљама), што доводи до квара система управљања и потенцијално изазива мноштво економских, еколошких и безбедносних проблема који могу озбиљно да угрозе оперативну ефикасност процеса.

Проблеми због кварова могу укључивати физичка оштећења процесне опреме, расипање сировина и енергије, повећање времена застоја у процесу, што резултира значајним губицима у производњи и угрожавање сигурности особља и животне средине. Управљање у поменутих ситуацијама које су резултат неисправности актуатора и сензора је велики изазов у индустрији пошто ненормалне ситуације представљају огромне цифре годишњег изгубљеног прихода.

Горенаведена разматрања пружају снажну мотивацију за развој метода и стратегија за пројектовање система аутоматског управљања толерантних на отказе који обезбеђују ефикасан и благовремен одговор како би се побољшао

опоравак од отказа, спречило његово ширење или развој у тоталне кварове и смањило ризик опасности по безбедност.

Вођени овим запажањима, аутори су изложили методе детекције и дијагнозе отказа, полазећи од основних концепата и принципа, преко напреднијих, све до имплементације у активне системе управљања толерантне на отказе.

Уџбеник је првенствено намењен студентима прве године мастер академских студија, на модулу за Аутоматско управљање и флуидну технику, студијског програма - машинско инжењерство. Осим тога, уџбеник се препоручује и студентима других техничких факултета за предмете сличне садржине. Имајући у виду значајан недостатак стручне литературе из ове области на српском језику, уџбеник може послужити и у образовању и усавршавању стручњака у привреди који се баве поменутиим и сличним проблемима.

На крају, али не и најмање важно, желимо да изразимо захвалност рецензентима, проф. др Саши Продановићу и доценту др Љубиши Дубоњићу, који су допринели да ова књига угледа светлост дана.

Април 2022,
Краљево

Владимир Стојановић,
Драган Пршић

Листа скраћеница

ДО	Детекција отказа
ДДО	Детекција и дијагноза отказа
УТО	Управљање толерантно на отказе
СУТО	Систем управљања који је толерантан на отказе
АСУТО	Активни систем управљања који је толерантан на отказе
ПСУТО	Пасивни систем управљања који је толерантан на отказе
КВ	Количник веродостојности
ГТКВ	Генерализовани тест количника веродостојности
SAFEPROCESS	Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes
IFAC	International Federation of Automatic Control
CUSUM	кумулятивна сума
КФ	Калманов филтар
НО	Наменски опсервер
ОННУ	Опсервер неосетљив на непознате улазе
ПР	Паритетне релације
ФДО	Филтар за детекцију отказа
PRBS	поворка псеудо случајних бинарних сигнала

Листа нотација

I	јединична матрица
O	нула матрица
\mathbb{R}^n	n – димензионални Еуклидски простор
$E\{\}$	оператор математичког очекивања
$\dim()$	димензија променљиве
\det	детерминанта
var	варијанса
cov	коваријанса
$\exp(x)$	e^x
k	дискретни број, дискретно време
\triangleq	једнако по дефиницији
\hat{x}	оцена (естимација) променљиве величине x
\tilde{x}	резидуал
\forall	за свако
$\ \cdot\ $	2 - норма
\propto	пропорционално
$x(k k-1)$	предикција за $x(k)$ на основу доступних података у $k-1$
$x(k k)$	Естимација $x(k)$ на основу доступних података у k

Листа појмова

Како би се избегла неконзистентност терминологије у литератури која се бави проблемима детекције и дијагнозе отказа, технички комитет SAFEPROCESS саставио је листу најчешће коришћених појмова и дао њихове дефиниције. Како је превод неизбежно делимично субјективан, за сваки термин наводимо и оригинал на енглеском језику. Текст који следи преузет је из [1], [2].

Стања и сигнали

- **Отказ** (енг. fault): Недозвољено одступање најмање једног карактеристичног својства или параметра система од своје прихватљиве, уобичајене или стандардне вредности.
- **Квар** (енг. failure): Трајни губитак способности система да остварује своју прописану функцију под одређеним условима рада.
- **Лажни аларм** (енг. faulse alarm): Сигнал индикације отказа када се у стварности отказ није десио.
- **Неисправност** (енг. malfunction): Повремена неправилност у остваривању прописане функције система.
- **Грешка** (енг. error): Одступање измерене или израчунате вредности излазне променљиве од њене стварне, задате или теоријски тачне вредности.
- **Поремећај** (енг. disturbance): Непознати и неуправљиви улаз који делује на систем.
- **Пропуштена детекција** (енг. missed detection): Стање када се не детектује отказ који се десио.
- **Резидуал** (енг. residual): Индикатор отказа, заснован на одступању мерења од прорачуна добијених на основу модела.
- **Симптом** (енг. symptom): Одступање неке доступне величине од нормалног понашања.

Функције

- **Детекција отказа** (енг. fault detection): Утврђивање присуства отказа у систему.
- **Изолација отказа** (енг. fault isolation): Утврђивање врсте и локације отказа, након што је он детектован.

- **Прилагођавање отказа** (енг. fault accomodation): Обезбеђивање одржавања сигурног рада система у случају отказа. Следи изолацију отказа.
- **Идентификација отказа** (енг. fault identification): Утврђивање величине и временског профила отказа, након што је он изолован.
- **Дијагноза отказа** (енг. fault diagnosis): Утврђивање врсте, локације, величине, временског профила отказа. Обухвата изолацију и идентификацију отказа.
- **Праћење** (енг. monitoring): Задатак континуалног утврђивања стања физичког система у реалном времену, прикупљањем информација и препознавањем аномалија у његовом понашању.
- **Надгледање** (енг. supervision): Праћење система и предузимање одговарајућих радњи како би се обезбедио наставак рада у присуству отказа.
- **Оцена резидуала** (енг. residual evaluation): Резидуал се оцењује у циљу детекције и дијагнозе отказа.
- **Заштита** (енг. protection): Средства помоћу којих се потенцијално опасно понашање система сузбија ако је могуће, или средства помоћу којих се избегавају последице опасног понашања.

Модели

- **Квантитативни модел** (енг. quantitative model): Опис понашања система дефинисањем математичких једначина (статичких и динамичких релација), које повезују његове променљиве и параметре.
- **Квалитативни модел** (енг. qualitative model): Опис понашања система дефинисањем квалитативних релација, као што су односи каузалности или ако-онда (енг. if-then) правила, између његових променљивих и параметара.
- **Дијагностички модел** (енг. diagnostic model): Скуп статичких и динамичких релација између симптома као улаза, и отказа као излаза.
- **Аналитичка или софтверска редунданса** (енг. analytical or software redundancy): Утврђивање вредности неке променљиве на два или више начина, при чему један од њих подразумева употребу математичког модела процеса у аналитичком облику.
- **Физичка или хардверска редунданса** (енг. physical or hardware redundancy): Утврђивање вредности неке променљиве употребом два или више резервних уређаја, који су непотребни током регуларног рада система, али обезбеђују његово несметано функционисање и у присуству отказа.

Особине система

- **Поузданост** (енг. reliability): Способност система да обавља жељену функцију под датим условима, у датом обиму, током датог временског периода.
- **Безбедност** (енг. safety): Способност система да не доводи особље, постројење или окружење у опасност.
- **Расположивост** (енг. availability): Вероватноћа да ће систем радити на задовољавајући и ефикасан начин у било ком тренутку.
- **Постојаност** (енг. dependability): Систем који има високу поузданост у смислу високе расположивости, где су последице отказа ограничене на систем сам по себи, тј. локални откази се не развијају у квар на нивоу целог система.

Особине методе детекције ошказа

- **Осетљивост** (енг. sensitivity): Способност методе да детектује отказе релативно малих величина.
- **Брзина реакције** (енг. reaction speed): Способност методе да открије отказе са релативно малим кашњењем након њиховог појављивања.
- **Робусност** (енг. robustness): Способност методе да ради у присуству шума, поремећаја, немоделоване динамике и лажних аларма.

Временски профил ошказа

- **Нагли** (енг. abrupt): Отказ који се моделује одскочном функцијом и представља померај у праћеном сигналу.
- **Постепени** (енг. incipient): Отказ који се моделује сигналом типа рампе и представља грешку у праћеном сигналу која се споро али непрекидно повећава.
- **Повремени** (енг. intermittent): Отказ типа поворке импулса различитих амплитуда.

Тип ошказа

- **Адитивни** (енг. additive) Отказ који се додаје на променљиву величину, нпр. померај (енг. offset) сензора.
- **Мултипликативни** (енг. multiplicative) Отказ који множи променљиву, нпр. промене параметара процеса.

Садржај

Предговор.....	v
Листа скраћеница.....	vii
Листа нотација.....	viii
Листа појмова.....	ix
Садржај.....	xii
1 Увод.....	1
1.1 Историсјки развој и значај детекције и дијагнозе отказа.....	1
1.2 Откази у системима управљања.....	7
1.3 Основни појмови.....	10
1.4 Функције.....	14
1.5 Узроци настанка отказа.....	16
1.6 Класификација отказа.....	16
1.7 Области перформанси управљања толерантног на отказе.....	26
1.8 Захтеви и својства система под отказима.....	29
2 Основе детекције и дијагнозе отказа.....	31
2.1 Системи за детекцију и дијагнозу отказа.....	31
2.2 Детекција и дијагноза отказа у управљању толерантном на отказе ..	32
2.3 Детекција и дијагноза отказа у надзорним системима.....	33
2.4 Појам физичке и аналитичке редундансе.....	35
2.5 Класификација метода за детекцију отказа.....	39
2.6 Критеријуми перформанси.....	44
2.7 Трендови истраживања и примене.....	45
2.8 Приступи за превазилажење отказа.....	48
2.9 Методологија дијагнозе отказа (приступ дијагнозе).....	48
2.10 Мере перформанси дијагнозе отказа.....	63
3 Системи управљања толерантни на отказе.....	64
3.1 Пасивни приступ.....	64
3.2 Активни приступ.....	66
4 Методе детекције отказа.....	74
4.1 Модел система са отказима.....	74
4.2 Распрезање поремећаја доделом сопствене структуре.....	75
4.3 Паритетне релације.....	77
4.4 Опсервери и филтери.....	80
4.4.1 Опсервери стања.....	81
4.4.2 Филтар за детекцију отказа.....	89
4.4.3 Калманов филтар.....	91
4.5 Идентификација система.....	97
4.5.1 Идентификација система и детекција отказа.....	98

4.5.2	Метод најмањих квадрата	99
4.5.3	Рекурзивно рачунање	102
4.5.4	Паралелни предиктор	108
4.5.5	Генерисање симптома за моделе идентификације	120
4.6	Методe за евалуацију резидуала	121
5	Методe дијагнозе отказа.....	126
5.1	Увод у дијагнозу отказа	126
5.2	Проблеми дијагнозе отказа.....	131
5.3	Дијагноза отказа заснована на методама класификације	134
5.4	Методe класификације у дијагнози отказа	135
5.4.1	Бајесова класификација.....	137
5.4.2	Стабло одлучивања	142
5.4.3	Геометријски класификатори	153
5.4.4	Полиномска класификација.....	155
5.4.5	Неуронске мреже.....	157
5.5	Методe закључивања у дијагнози отказа	169
5.5.1	Стабло отказа	170
5.5.2	Апроксимативно резоновање	177
Литература		185

CIP - Каталогизација у публикацији –
Народна библиотека Србије, Београд

681.51.09(075.8)

СТОЈАНОВИЋ, Владимир, 1983.

Детекција и дијагноза отказа у системима аутоматског
управљања / Владимир Стојановић, Драган Пршић. -
Краљево : Универзитет у Крагујевцу, Факултет за
машинство и грађевинарство, 2022 (Читлук : SaTCIP). -
XIII, 191 стр. : илустр. ; 25 cm

Тираж 50. - Библиографија: стр. 185-191.

ISBN 978-86-81412-16-9

1. Пршић, Драган, 1962.- [аутор]

а) Системи аутоматског управљања - Кварови -
Дијагностика

COBISS.SR-ID 66853129

--