

Универзитет у Крагујевцу
Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву

Војислав Ж. Филиповић

Индустријски регулатори

Краљево, 2016.

др Војислав Ж. Филиповић, ван. професор

Индустријски регулатори

Рецензенти

др Новак Недић, ред.проф. Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву

др Зоран Бучевац, ред. професор Машинског факултета у Београду

др Зоран Рибар, ред. професор Машинског факултета у Београду

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

Јован Дашић

Техничка обрада

Биљана Филиповић

Владимир Ђорђевић

Одобрено за штампу

Одлуком Наставно-научног већа Факултета за машинство и грађевинарство у

Краљеву,

број 1400/1 од 04.10.2016. године

Штампа

SaTClP, Врњачка Бања

Тираж

100 примерака

Свет је моја представа.

Артур Шопенхауер

Предговор

Теорија управљања, мада релативно млада, спада у врло развијене теорије. С друге стране је и даље вибрентно подручје погодно за интензивна истраживања. Развој теорије је пролазио кроз различите фазе. Почетни резултати су везани за фреквентно подручје у којем робусност на неизбежну немоделовану динамику игра важну улогу. Крај педесетих и почетак шездесетих година прошлог века поставио је тежиште развоја теорије у простор стања. Појавили су се бриљантни резултати (Белманово динамичко програмирање и Понтрјагинов принцип максимума). Добијени резултати су изазвали егзалтацију у научним круговима. Добијена је, мислило се, панацеја за све проблеме. Али конфронтација теорије са практичним проблемима је утицала на значајну редукцију егзалтираности. Наиме, показало се да нарушавање услова оптималности, што је у пракси пре правило него изузетак, значајно деградира перформансе система управљања јер горе поменуте теорије нису укључивале концепт робусности. Био је нужен повратак на класичну теорију управљања и он се догодио почетком осамдесетих година прошлог века. У међувремену је развијена респектабилна теорија робусних система управљања. Примера ради развијена је робусна теорија Понтрјагиновог принципа максимума (Boltianski, V.G. and Poznyak, A.S. (2010): *The Robust Maximum Principle. Theory and Applications*. Basel: Birkhauser). Неокласицизам, у теорији управљања, имао је утицаја и на материјал изложен у уџбенику.

Алгоритми управљања, поред хардвера и софтвера, представљају трећу компоненту високих технологија. Они, у доброј мери, дефинишу технички статус друштва и постали су синоним за његов висок ниво. Нема области у којој нека форма управљања није присутна. У току су интензивна истраживања да се, осим за регулисање система, теорија примени и у: математичкој биологији, аутоматском регулисању процеса анестезије, аутоматском управљању Интернета и пакетних комуникационих рачунарских мрежа и у многим другим подручјима. Норберт Винер је дефинисао повратну спрегу као фундаментални принцип за „живе организме и машине” (Winer, N. (1961): *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge, Massachushtts: MIT Press)

Материјал изложен у књизи прекрива план и програм предмета „Индустријски регулатори“ који аутор држи на првој години Мастер студија на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву. Разуме се да обим књиге значајно превазилази потребе предмета. Аутор се нада да од тога могу имати користи студенти који самостално желе да прошире своја знања, као и инжењери у пракси.

У наставку ћемо укратко представити садржаје појединих глава.

У првој глави представљен је историјат развоја теорије аутоматског управљања. Показано је да постоје два фундаментална принципа регулисања: принцип повратне спреге и комбиновани принцип који се састоји из стратегије повратне спреге и стратегије управљања по мерљивом поремећају. Уведен је и концепт девијационе променљиве.

Друга глава је посвећена математичким моделима процеса: посебно је посвећена пажња моделима првог и другог реда, који се најчешће користе у процесној индустрији. Разматрани су и модели са кашњењем. Феномен кашњења креира додатне проблеме при њиховом регулисању. Такође су уведени и модели високог реда. Пројектовање регулатора за такве процесе представља, такође, изазов.

У трећој глави разматрани су поремећаји. По мишљењу аутора то је врло важна тема. Поремећаји и, у пракси ретко присутни нестабилни системи, су главни разлог постојања аутоматског управљања. Природа поремећаја, у доброј мери, одређује методологију пројектовања регулатора. Разматрани су детерминистички поремећаји и стохастички поремећаји. Поред наведеног разматрана је и класа поремећаја којој је у литератури посвећена мала пажња. То су на делове полиномијални поремећаји који имају особине и детерминистичких и стохастичких поремећаја. На крају су разматрани *скоро произвољни поремећаји* (униформно ограничени поремећаји).

Четврта глава је посвећена рекурзивној идентификацији. Ова област елиминише слабости „нека је дат модел“. Наиме, коришћењем мерења улаза и излаза система, применом одређених процедура, добија се математички модел процеса. Разматране су процедуре са скаларним појачањем и процедуре са матричним појачањем. У првој класи алгоритама разматрани су Качмажов алгоритам, стандардна стохастичка апроксимација и стохастичка апроксимација са усредњавањем. Стохастичка апроксимација са усредњавањем има, у асимптотском смислу, исту брзину као и метод најмањих квадрата. Централно место процедура са матричним појачањем има метод најмањих квадрата. Из овог метода природно следе метод инструменталних променљивих и метод проширених најмањих квадрата. Изложена је методологија одређивања реда модела процеса (Акаикеов критеријум). За идентификацију нелинеарних система описана је процедура за идентификацију Хамерштајнових модела. Такође је разматрана могућност повећања брзине конвергенције градијентних алгоритама.

Глава пет детаљно разматра ПИД алгоритам. Такође се разматрају и друге врсте алгоритама чија је улога да побољшају прелазне процесе круга регулисања. Као кандидат за ту врсту регулатора су хибридни регулатори који се састоје из прекидачке секвенце и коначне колекције линеарних регулатора (нпр. ПИД регулатори). Ова врста регулатора је робусна у односу на значајни износ немоделоване динамике. Као подкласа ових регулатора разматрани су регулатори са ресетовањем, за које је идеолошку основу поставио Клег 1958 године.

У глави шест описане су методе за подешавање ПИД регулатора. То су, пре свега, класичне Зиглер-Николсове методе. Затим је представљена процедура самоподешавања заснована на релејном експерименту. На крају су описане методе адаптације за подешавање регулатора. У овом случају непрекидно се подешавају параметри регулатора. Описана су два типа адаптивних регулатора:

индиректни и директни. Ове врсте регулатора су последице присуства кашњења у моделу процеса.

Глава седам се бави проблемима регулисања система са кашњењем. Када је кашњење система велико развијена је посебна класа закона управљања. За стабилне системе решење је предложио Смит 1957. године и овај случај је описан у седмој глави. Напоменимо да је решен и случај када су системи нестабилни. Решење је компликованије и оно није разматрано у књизи.

У осмој глави разматрано је пројектовање дигиталних регулатора. Најпре је описано пројектовање регулатора у континуалном домену, засновано на релејном експерименту. Тако добијен регулатор се дискретизује. Затим је разматран врло важан проблем Q – параметризације регулатора. Овим поступком се добија континуум стабилизујућих регулатора који зависе од стабилне преносне функције Q . Пројектовање регулатора се своди на избор функције Q . Тај избор може бити хеуристички и заснован је на инжењерском знању и интуицији. Формалан избор је везан за методе оптимизације и тако се могу добити добро познати оптимални регулатори H_2 и H_∞ . Следећи корак је разматрање робусности у односу на немоделовану динамику. У глави су представљени различити описи немоделоване динамике. Уведена је и мера робусности (Виникомбе-ова метрика). Затим је приказано решење пројектовања робусног ПИД регулатора засновано на конвексној анализи. На крају је представљено пројектовање дигиталног регулатора у z – домену, засновано на методологији подешавања полова система са затвореном повратном спрегом. Такође су разматрани специјални случајеви ове методологије: системи са коначним прелазним процесом и регулатори засновани на унутрашњем моделу.

Девета глава је посвећена предиктивним регулаторима. Ова класа регулатора је најзаступљенија у пракси после ПИД регулатора. То су софистициране стратегије чија примена обезбеђује значајне економске бенефиције. У глави је детаљно разматран најчешће примењиван регулатор, заснован на динамичкој матрици процеса (DMC регулатор). Избором хоризонта предикције могу се превазићи нетривијални проблеми кашњења и неминимално фазности. Оно што је важно за ове класе регулатора јесте: (i) лако проширење алгорита на мултиваријабилне процесе; (ii) лако увођење различитих ограничења. На крају главе наведени су најпознатији комерцијални предиктивни регулатори као и фирме које их производе

У глави десет представљене су различите примене скаларних регулатора: регулатори по мерљивом поремећају, каскадни регулатори, регулатори односа, регулатори са структурираним опсегом, као и селективно управљање.

Последња глава, у свом првом делу, бави се применама теорије управљања на неке индустријске процесе. Прво је разматран проблем регулисања парних котлова у термоелектранама са тежиштем на трокомпонентну стратегију регулисања. После тога је разматрано регулисање бинарне дестилационе колоне. Важан аспект регулисања је и уштеда енергије. У овој глави је описана уштеда заснована на замени класичних аутоматских вентила фреквентним регулаторима, који обезбеђују промену протока променом брзине обртања асинхроног мотора. У последњем делу главе приказана је корелација између структуре регулатора и типа извршног органа (са пнеуматским погоном или са електромеханичким погоном). Детаљно је описан троположајни ПИД регулатор, који се добија

применом једне класе нелинеарних система (системи са клизним режимима). На самом крају описана је архитектура савременог система управљања.

Велики посао на техничкој обради текста обавила је Билљана Филиповић, док је припрему великог броја слика урадио Владимир Ђорђевић, студент Докторских студија на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву. Аутор им се на томе захваљује.

Октобар 2016
Краљево

Војислав Ж. Филиповић

Садржај

Предговор.....	v
Садржај.....	ix
1 Увод.....	1
1.1 Приступи регулисању процеса	1
1.1.1 Регулатор Ползунова	1
1.1.2 Ватов регулатор	2
1.1.3 Регулатор Понселеа	3
1.1.4 Регулатор браће Сименс	3
1.1.5 Фундаментални принципи регулације	4
1.2 Девијационе променљиве	5
1.2.1 Лапласове трансформације девијационих променљивих	6
1.2.2 Линеаризација нелинеарних система	7
1.3 Модел једног индустријског процеса	8
1.4 Литература	13
2 Модели и особине процеса	15
2.1 Круг регулисања	15
2.2 Континуални системи и сигнали	19
2.2.1 Систем првог реда	19
2.2.2 Системи другог реда	22
2.2.3 Карактеристике одзива система другог реда	25
2.2.4 Динамика система вишег реда	28
2.3 Литература	31
3 Дискретни модели поремећаја	33
3.1 Z - Трансформација	33
3.2 Теорема о одабирању	34
3.3 Моделовање дигиталних система	35
3.3.1 Модел А/Д претварача	36
3.3.2 Модел Д/А претварача	36
3.4 Дискретна преносна функција	38
3.5 Модели поремећаја	40
3.5.1 Детерминистички поремећаји	40
3.5.2 Стохастички поремећаји	45

3.5.2.1 Основни појмови из теорије вероватноће и стохастичких процеса	45
3.5.2.2 Класе стохастичких поремећаја	46
3.5.3 На делове полиномијални поремећаји	48
3.5.3.1 Континуални поремећаји	49
3.5.3.2 Дисконтинуални поремећаји	51
3.5.4 Ограничени поремећаји	53
3.6 Литература	53
4 Рекурзивна идентификација динамичких система	55
4.1 Модели	56
4.1.1 Линеарни модели	56
4.1.2 Нелинеарни модели	59
4.2 Критеријум	60
4.3 Алгоритми идентификације	61
4.3.1 Качмажов алгоритам	63
4.3.2 Метод најмањих квадрата	66
4.3.3 Метод инструменталних променљивих	74
4.3.4 Рекурзивни алгоритми за идентификацију ARMAX и OE модела	75
4.3.4.1 Псеудо линеарна регресија	76
4.3.4.2 Концепт референтног модела	77
4.3.5 Стохастичка апроксимација	80
4.3.5.1 Стандардна процедура стохастичке апроксимација	81
4.3.5.2 Стохастичка апроксимација са усредњавањем	83
4.3.5.3 Мултииновациони рекурзивни алгоритми	85
4.3.6 Рекурзивна идентификација Хамерштајнових модела	87
4.3.7 Рекурзивни алгоритми идентификације на класи расподела вероватноћа	90
4.4 Литература	94
5 ПИД регулатори	97
5.1 П – регулатор	97
5.2 И – регулатор	108
5.3 Д – регулатор	108
5.4 Практичне структуре регулатора	108
5.4.1 ПД регулатори	108
5.4.2 ПИ регулатори	108
5.4.3 Спречавање zasiћења интегратора	110
5.4.4 ПИД регулатори	114
5.4.5 ПИД регулатор са два степена слободе	117

5.4.6 Ограничења ПИД регулатора	118
5.5 Хибридни регулатори	120
5.5.1 Зашто дисконтинуална повратна спрега?	121
5.5.2 Хибридни ПИ регулатори	124
5.5.3 Интелигентни хибридни ПИД регулатори	129
5.5.4 ПИД регулатор заснован на Лебеговој периоди одабирања	132
5.5.5 Клегов интегратор и концепт система са ресетовањем	133
5.6 Литература	137
6 Подешавање ПИД регулатора	141
6.1 Подешавање регулатора	141
6.1.1 Зиглер – Николсове методе	141
6.1.1.1 Коментар о Зиглер – Николсовим методама	146
6.2 Самоподешавање регулатора	146
6.2.1 Метод заснован на фреквентном одзиву	147
6.3 Адаптивни регулатор	156
6.3.1 Регулатор минималне варијансе	156
6.4 Литература	166
7 Смитов регулатор	169
7.1 Неки примери процеса са кашњењем	169
7.1.1 Процес са транспортним кашњењем	169
7.1.2 Управљање преко комуникационих рачунарских мрежа	170
7.1.3 Процеси високог реда	171
7.2 Идентификација процеса са кашњењем	172
7.3 Смитов предиктор за стабилне процесе са кашњењем	174
7.3.1 Филтрација грешке предикције	176
7.3.2 Побољшање потискивања поремећаја	177
7.4 Литература	181
8 Пројектовање дигиталних регулатора	185
8.1 Пројектовање аналогних регулатора и њихова дигитална имплементација ..	185
8.1.1 Пројектовање дигиталних регулатора применом релејног експеримента	186
8.1.2 Јоула-ова параметризација	191
8.1.2.1 Функције осетљивости	192
8.1.2.2 Јоула-ова параметризација за стабилне системе	194
8.1.2.3 Афина параметризација за системе са кашњењем	197
8.1.2.4 Јоула-ова параметризација за нестабилне системе	198
8.1.3. Пројектовање робусног ПИД регулатора применом конвексне анализе ..	199
8.2 Пројектовање дигиталних регулатора у z - домену	203

8.2.1. Јоула – Кучерина параметризација	204
8.2.2. Метод подешавања полова.....	205
8.2.3. Специјални случајеви метода подешавања полова	211
8.3 Литература	214
9 Предиктивни регулатори	217
9.1 Математички модел процеса.....	217
9.2 Критеријум управљања.....	220
9.3 Регулатор заснован на динамичкој матрици процеса.....	222
9.4 Мултиваријабилни DMC регулатор	226
9.5 Ограничења и оптимизација	227
9.6 Комерцијални предиктивни регулатори	230
9.7 Литература	231
10 Регулисање процеса скаларним регулаторима.....	233
10.1 Управљање по поремећају.....	233
10.1.1 Статички регулатор по поремећају	235
10.1.2 Динамички регулатор по поремећају.....	237
10.1.3 Генерални приступ пројектовању регулатора по поремећају.....	238
10.1.4 Неки аспекти синтезе регулатора по поремећају.....	241
10.1.5 Практична примена регулатора по поремећају.....	242
10.2 Регулатор односа.....	245
10.3 Напредне стратегије управљања са скаларним регулаторима.....	248
10.3.1 Каскадно управљање	248
10.3.2 Управљање на структурираном опсегу.....	250
10.3.3 Селективно управљање	252
10.4 Литература	254
11 Примене индустријских регулатора	257
11.1 Регулисање нивоа у добошу парних котлова	257
11.2 Регулисање бинарне дестилационе колоне.....	263
11.3 Уштеда енергије применом фреквентних регулатора	270
11.4 Извршни органи у круговима регулисања.....	273
11.4.1 Аутоматски вентил са пнеуматским погоном.....	273
11.4.2 Аутоматски вентил са електромоторним погоном	275
11.4.2.1 Концепт система са клизним режимима	275
11.4.2.2 Троположајни ПИД регулатор	278
11.5 Савремена конфигурација система управљања процеса.....	283
11.6 Литература	287

CIP- Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

681.515(075.8)

621.3.078(075.8)

ФИЛИПОВИЋ, Војислав Ж., 1952-

Индустријски регулатори / Војислав Ж. Филиповић. -
Краљево: Факултет за машинство и грађевинарство,
2016 (Врњачка Бања: SaTCIP). -
XII, 289 стр. : илустр. ; 24 cm

На врху насл. стр.: Универзитет у
Крагујевцу. - Тираж 100. - Библиографија уз
свако поглавље.

ISBN 978-86-82631-83-5

а) Аутоматска регулација б) Системи аутоматског
управљања – Регулациони уређаји

COBISS.SR-ID 226861324