

Универзитет у Крагујевцу
Машински факултет Краљево

Војислав Ж. Филиповић

Новак Н. Недић

ПИД регулатори

Краљево, 2008.

др Војислав Ж. Филиповић, доцент
др Новак Н. Недић, ред. професор

ПИД регулатори

Рецензенти

др Зоран Бучевац, ред. професор Машинског факултета у Београду
др Драган Радојевић, научни саветник Института „Михаило Пупин“ Београд

Статус публикације

Научна монографија

Издавач

Универзитет у Крагујевцу
Машински факултет Краљево, Доситејева 19, 36000 Краљево

За издавача

Проф. др Новак Н. Недић, декан

Дизајн корица

Драган Пешић

Техничка обрада

Бојан Белоица
Владимир Стојановић

Одобрено за штампу

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Краљево,
број 1083/7 од 26. 12. 2007. године

Штампа

АДМ графика, 36000 Краљево

Тираж

300 примерака

Издавање ове научне монографије помогло је
Министарство за науку и технолошки развој Републике Србије

*Између идеје
И стварности
Између покрета
И чина
Пада сенка*

Т. С. Елиот

Предговор

ПИД регулатори имају централно место у управљању индустријским процесима. Без обзира на несумњива теоријска достигнућа у креирању сложенијих стратегија управљања, ова врста регулатора је заступљена са преко 95% од свих коришћених регулатора у индустрији. Реализација ПИД алгорита тесно је повезана са нивоом технологије. Крајем тридесетих година прошлог века појавили су се пнеуматски регулатори. Са развојем електронике најпре су се појавили аналогни регулатори реализовани аналогним електронским компонентама. Појава микропроцесора и микроконтролера омогућила је развој дигиталних ПИД регулатора који се појављују као самостални модули или у оквиру ПЛЦ – а као софтверски или хардверски модули.

Историјски посматрано, креирање теорије управљања везано је за парну машину, као један од кључних атрибута индустријске револуције. У периоду од 1765 –1829 године, откривени су кључни принципи регулисања који су и данас актуелни. Ти принципи су регулисање коришћењем повратне спреге и регулисање по мерљивом поремећају. Премда су се појављивали приступи регулисању за које се мислило, у први мах, да припадају категорији фундаменталних принципа, пажљива анализа је показала да се они могу свести на један од поменута два принципа.

Покушај да се направе парне машине већег енергетског капацитета захтевао је дубље разумевање механизма регулисања. Чувени шкотски научник физичар Џемс Кларк Максвел (1968) је први поставио проблем стабилности система. Његов покушај да га реши завршио се констатацијом да је то врло тежак проблем. Па ипак, то је био изузетно важан корак. Захваљујући напору великог броја научника створена је, до краја XX века, моћна теорија стабилности динамичких система.

Књига представља скуп фундаменталних аспеката ПИД алгорита, оригиналних резултата аутора из тог подручја и пресека савременог стања појединих сегмената области. Првенствено је намењена истраживачима, али може бити од интереса и за инжењере у пракси. Због хетерогености тема није било могуће задржати исти ниво математичке машинерије у целој књизи. Аутори су се руководили принципом да *"ствари треба презентирати једноставно, колико је то могуће, али не једноставније од тога!"*.

У наставку ћемо укратко представити садржаје појединих глава.

Глава 1, у првом делу, посвећена је историји почетака стварања теорије управљања. У периоду од 1765-1829 године, захваљујући напорима на усавршавању рада парне машине откривени су основни принципи регулисања процеса. Више од тих принципа ни данас се не зна. Оно што се мењало у времену

је интензиван развој технологије који је мењао само начине реализације већ познатих принципа. Да би се избегле недоумице, које према искуству аутора, постоје међу инжењерима у индустрији, уведен је концепт девијационе променљиве. На крају главе, на бази фундаменталних закона, представљен је математички модел процеса загревања флуида у резервоару на коме је демонстрирана интерпретација улаза, излаза и поремећаја процеса. Понекад је нетривијално одредити ове величине. Модел је експлоатисан на различитим местима у књизи. Такође је демонстрирано упрошћавање модела увођењем различитих претпоставки о процесу.

У другој глави су дати математички модели типичних индустријских процеса (процеси првог, другог и вишег реда). Разматрани су и одзиви наведених процеса. Затим су детаљно описана двојства П, И и Д регулатора. По мишљењу аутора, корисно је познавање ситуација којима одговарају специфичне структуре регулатора, па је том проблему посвећена одговарајућа пажња. Једна од кључних превенција при пројектовању ПИД регулатора је спречавање засићења интегратора. Описан је поступак којим се то постиже. Такође су представљени ПИД регулатор са два степена слободе и принцип псеудодеривативне повратне спреге која спречава увођење нула у преносну функцију система са затвореном повратном спрегом. Псеудодеривативна повратна спрега користи добре особине Д члана уз елиминацију проблема везаних за присуство овог члана у директној грани система. Затим су разматрана ограничења ПИД алгорита у случајевима: процеси чији је математички модел високог реда, резонантни процеси и процеси са кашњењем. Након тога описана је релативно нова класа ПИД регулатора. То су фракциони регулатори који проистичу из чињенице да се неки индустријски процеси описују диференцијалним једначинама са нецелобројним редом једначине. Показано је да је класични ПИД алгоритам само специјални случај фракционих ПИД алгоритама. На крају главе описана је, такође, нова класа алгоритама управљања. То су хибридни регулатори. Они произилазе из чињенице да се реални процес може описати као симбиоза диференцијалне једначине и аутомата са коначним стањима. Наведени су разлози за увођење дисконтинуалне повратне спреге. Детаљно је представљен хибридни ПИ регулатор. У наставку је описан интелигентни хибридни регулатор који се састоји из два регулатора: конвенционалног ПИД регулатора и фази регулатора. Крај главе је посвећен ПИД регулатору заснованом на Лебеговој периоди одабирања. У овом случају периода одабирања није константна. Информација о сигналу мерења узима се само уколико се она довољно промени. Ова класа регулатора је необично важна у системима где постоји комуникациона рачунарска мрежа. Напоменимо, на крају, да је анализа система са Лебеговом периодом одабирања екстремно тешка.

Трећа глава посвећена је различитим аспектима подешавања ПИД регулатора. На почетку су, укратко, описане трансформације: Лапласова, дискретна и делта. Показује се да делта трансформација на јединствен начин описује континуалне и дискретне системе. Затим је разматран проблем подешавања регулатора. Најпре су описане Зиглер – Николсове методе које су се појавиле четрдесетих година прошлог века. Њихова презентација је уклопљена у парадигму савремене дефиниције управљачког проблема. У методама су присутне фаза идентификације процеса (одзив на одскочну побуду и фреквентни

одзив) која обезбеђује математички модел процеса и фаза пројектовања регулатора, која се састоји у дефинисању критеријума перформансе регулисања, који је у овом случају једночетвртинско слабљење амплитуде одзива система. Проблем са Зиглер – Николсовим методама је што, осим за П регулатор, не дају јединствен скуп параметара регулатора. Други проблем је што је робусност регулатора, подешеног према Зиглер – Николсовој методи, релативно мала и овај проблем је предмет интензивног истраживања. У наставку су изложене методе засноване на Зиглер – Николсовим методама: Чиен – Хронес – Ресвикова метода, Кохен – Кунав метода и Тиреус – Лајбенова метода. Такође су изложене методе: метод подешавања полова, метод доминантних полова, ламбда метода и метод управљања преко интерног модела. На крају овог дела предложена је дигитална реализација ПИД алгоритма заснована на подешавању полова. Други део главе посвећен је проблему самоподешавања регулатора. Самоподешавање значи да регулатор ступа у процедуру подешавања параметара само на захтев оператора (оператор преко тастатуре иницира подешавање регулатора). Посебна пажња је посвећена хармонијској линеаризацији процеса за који се претпоставља да се понашају као нискофреквентни филтри. Разматрана су побољшања, а такође и проблем самоподешавања у присуству поремећаја оптерећења. Важно је напоменути да велики број савремених индустријских регулатора има овај механизам самоподешавања. Последњи део главе посвећен је адаптацији ПИД алгоритма. За разлику од самоподешавања, адаптација непрекидно ажурира вредности параметара П, И и Д. Кључни ингредијенти су рекурзивна идентификација процеса и принцип сигурне еквиваленције који синтезу регулатора заснива на претпоставци да су, у одређеној итерацији, оцене вредности параметара једнаке правој вредности параметара. У овом делу главе, најпре је описан метод рекурзивне идентификације (метод најмањих квадрата, проширен метод најмањих квадрата и метод инструменталних променљивих) а после тога су резултати примењени на синтезу два адаптивна регулатора. Први представља примену теорије селективно инваријантног управљања. Уведена је двострука периода одабирања (периода одабирања у процедури идентификације је два пута већа од периоде одабирања регулатора). Овакав избор периода одабирања обезбеђује значајну робусност система у затвореној спрези. На крају је представљен стохастички адаптивни регулатор са адаптивном периодом одабирања. Процес је моделован као Батервардов нискофреквентни филтар. Алгоритам идентификације је једноставан. Оцењује се само амплитуда филтра и гранична учестаност филтра. На бази граничне учестаност филтра одређује се периода одабирања. Синтеза регулатора заснована је на методологији подешавања полова.

Четврта глава посвећена је регулисању процеса са кашњењем. Кашњење је један од најтежих елемената са позиције управљања. Овај елемент постоји у различитим типовима процеса. Он се појављује и у софистицираним системима управљања у којима постоји комуникациона рачунарска мрежа која уноси стохастичко кашњење. Идентификација процеса са кашњењем може бити графичка и аналитичка. Изложене су обе методологије. Могуће је конципирати рекурзивни алгоритам идентификације који истовремено оцењује непознате параметре модела система, ред модела система и време кашњења. Затим је разматран Смитов предиктор за стабилне процесе са кашњењем. Његово

побољшање може се постићи увођењем информације по мерљивом поремећају. Ако се поремећај не може мерити уводи се обсервер поремећаја. Много тежи проблем је ако је процес нестабилан или је интеграторског типа. Овом проблему је посвећено енормно много пажње и предложене су различите модификације основне структуре Смитовог предиктора. И у овом случају, за побољшање перформанси предиктора, може се увести мерљиви поремећај или обсервер поремећаја. Такође је разматрана могућност да се ПИД регулатор користи за регулисање процеса са кашњењем, при чему је уведен концепт еквивалентног регулатора. У наставку је разматран проблем апроксимације модела процеса са кашњењем применом функционалне анализе. Познато је да апроксимација експоненцијалног члана (прва и друга Падеова апроксимација) није у стању да обезбеди пројектовање регулатора тако да систем буде робусан. Разлог лежи у чињеници одсуства грешке апроксимације. У овој глави је предложена апроксимација модела уз експлицитну грешку апроксимације. У том случају, за стабилне процесе није потребан Смитов предиктор јер се коришћењем репертоара робусне теорије управљања може пројектовати робусни регулатор. Шта више могуће је предложити нову теорију регулисања индустријских регулатора.

Глава 5 је посвећена различитим структурама система управљања у чијој основи лежи експлоатација скаларних регулатора. Најпре је разматрана врло важна стратегија регулисања по поремећају. Описани су статички и динамички регулатори по поремећају, а затим је изложена општа процедура за синтезу ових регулатора. У применама се ови регулатори могу побољшати коришћењем концепта повратне спреге. Као специјална врста регулатора по поремећају представљен је регулатор односа. Дате су две методе за пројектовање ових регулатора. Затим су представљене напредне стратегије управљања. каскадно управљање, управљање на структурираном опсегу и селективно управљање. Примена селективног управљања демонстрирана је на систему регулисања односа ваздух – гориво, што је необично важно за квалитет сагоревања.

Шеста глава посвећена је применама ПИД регулатора. Прво је разматран проблем регулисања парних котлова и то одржавање нивоа у добошу. Описани су, за овај процес, специфични феномени (инверзан одзив, нарастање и смањење нивоа) а затим је приказана еволуција савременог система за регулисање нивоа воде у добошу. Представљене су две верзије система регулисања нивоа. На крају је описан начин регулисања малих парних котлова. Следећи практични проблем односи се на бинарну дестилациону колону. Математички је описана идеализована бинарна дестилациона колона. Добија се модел високог реда што представља проблем за синтезу регулатора. Затим је приказана једна практична структура система управљања дестилационом колоном. Последњи део главе односи се на могућност уштеде енергије применом савремених технолошких решења. Идеја се састоји у томе да, тамо где је то могуће, буде елиминисан аутоматски вентил. На аутоматском вентилу врши се дисипација хидрауличке енергије, што представља главни извор губитака енергије. Применом фреквентних регулатора који могу мењати број обртаја асинхроног мотора, могуће је тачно прилагођење потребном оптерећењу тако да аутоматски вентил постаје непотребан. Овим се постижу значајне уштеде у енергији, а нови

извршни орган је комбинација фреквентног регулатора, асинхроног мотора и центрифугалне пумпе.

Огроман посао на техничкој обради текста обавили су Бојан Белоица, дипломирани машински инжењер, администратор система на Машинском факултету у Краљеву и Владимир Стојановић, дипломирани машински инжењер, студент докторских студија на истом факултету. Аутори су им на томе веома захвални.

Новембар 2008
Краљево

Војислав Ж. Филиповић
Новак Н. Недић

CIP- Каталогизација у публикацији
Народна публика Србије, Београд

681.515.8

ФИЛИПОВИЋ, Војислав Ж., 1953.

ПИД регулатори/Војислав Ж. Филиповић,
Новак Н. Недић - Краљево: Машински
факултет, 2008 (Краљево: АДМ графика). -
IX, број стр. 257 стр. : илустр. 173 ; 24 cm

На врху насл. стр.: Универзитет у
Крагујевцу - Тираж 300 - Библиографија уз
свако поглавље

ISBN 978-86-82631-49-1

1. Недић, Новак Н., 1952. - [аутор]

а) Пропорционални интегрално диференцијални
регулатори

COBISS.SR-ID 152368652