



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



Бојан З. Кнежевић

ПОБОЉШАЊЕ УПРАВЉАЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА ПОГОНА МЕХАТРОНИЧКИХ СИСТЕМА

Бања Лука, 2022.

О аутору

др БОЈАН З. КНЕЖЕВИЋ, дипл. инж. ел. тех., доцент (26. октобар 1982, Бања Лука). Живи и ради у Бањој Луци гдје је завршио Основну школу „Вук С. Караџић“, средњу Електротехничку школу „Никола Тесла“ и Електротехнички факултет. Радио је у предузећу Конел, Лакташи. Мастер студиј завршио је на Електротехничком факултету у Београду. Докторирао је на Факултету техничких наука у Новом Саду. На Машинском факултету у Бањој Луци биран је за асистента, вишег асистента и доцента. Шеф је Катедре за мехатронику и роботiku и шеф Лабораторије за мехатронику и роботiku. Објавио је више од 25 научних радова у међународним и домаћим часописима и зборницима са конференција. Члан је уређивачког одбора два инострана научна часописа и двије домаће научне конференције. Добитник је награде Универзитета за остварене међународне резултате у научно-истраживачком раду 2017. године. Аутор је преко 100 стручних пројеката из области мехатронике, аутоматизације и лифтоградње.



ISBN 978-99976-11-00-0

Аутор

Доц. др Бојан З. Кнежевић

Рецезенти

Проф. др Бранко Блануша

Проф. др Дарко Марчетић

Издавач

Универзитет у Бањој Луци

Машински факултет Бања Лука

За издавача

Проф. др Александар Милашиновић, декан

Припрема за штампу

Доц. др Бојан З. Кнежевић

Графички дизајн

Доц. др Бојан З. Кнежевић

Штампа

Графомарк, Лакташи

Бања Лука, 2022.

ISBN 978-99976-11-00-0

Издавање ове научне монографије одобрено је одлуком Научно-наставног вијећа Машинског факултета Универзитета у Бањој Луци, број 16/3.1553/22 од 21.12.2022. године.

ПРЕДГОВОР

Научна монографија „Побољшање управљачких карактеристика погона мехатроничких система“ је систематизован и заокружен у једну цјелину дио резултата мог научно-истраживачког рада којим се бавим већ четрнаест година.

Први моји истраживачки резултати, који су се нашли у овој монографији и који су били темељ мом каснијем професионалнијем бављењу науком, датирају још из мог дипломског рада.

Од рођења сам упућен на лифтове. Највећи дио свог живота проживио сам на једанаестом спрату солитера. У тај период рачуна се и тужно ратно доба када лифтови нису радили. Тада су подсјећали на мрачне бетонске шпиље у којима су се само могли, трачком дневне свјетлости која је успијевала некако да се провуче до дубине стубишта, назирати масни и паучином обрасли дијелови металних конструкција.

Идући пјешке, монотонију полумрачних и тихих степеништа разбијао је језив призор, који се сваки пут указивао на другом мјесту али са истим страхом који се рађао у стомаку и слијевао у ноге, које су потом успоравале и тражиле најкраћи пут до следећег спрата. Заглављена кабина лифта, као скелет мртваца, у мраку, у неприродном положају, висила је. Подсјећала на тугу и смрт која се ширила око нас, на јаук и бол рањених, напуштених, одбачених, на вријеме које је стало. Истовремено, на неки чудан начин мамила је сажаљење. Ако је глуво доба као што је било глуво вријеме и ако се тихо шуњаш као да се кријеш, могао си да чујеш тихи вапај којим је, као на издисају, изнемоглим гласом позивала, обраћала се желећи да каже своју посљедњу жељу, остави опоруку, поздрави неког вољеног или само да замоли да је не забораве.

Тишина је на крају побјеђивала, и човјека и лифтове. Човјек се са временом навикне на све, и да је смрт дио живота, и да је туга ту јер не би знали за радост, и да може да се живи и без свјетла и са мраком. Лифтови се ипак нису дали. Они се нису помирили са судбином. Чим је звук олова који сјече ваздух надјачао смијех и када су птице вратиле небо себи за дом из којег су биле протјеране, и лифтови су се пробудили. Насукани бродови у вертикалним каналима брзо су поскочили, просвијетлили, раширили своја врата, затегли ужад, растрчали се горе – доље, као млади коњи пуштени у рано прољеће да својим снажним копитама избришу заостале трагове посљедњег снијега и својим гласним и веселим рзањем охрабре сунце да се дуже задржи на небу.

Није све било тако бајковито. Само привидно су ти весели вранци одисали спремношћу за неуморан даноноћни рад. Густа паучина прекрила је дубоке боре избраздане годинама проведеним у мраку. Први жустри покрети гриве и репа открили су истину. Лифтови су све чешће били у квару. Овај пут освијетљени јер мрак је

заувјек протјеран, али несигурни. У то вријеме, код лифтова је је било сигурно само на ком спрату си ушао, све остало је било лутрија. Та томбола је могла да се игра до банкрота живаца. Нити знаш на којем спрату ћеш изаћи, да ли ћеш изаћи, између којих спратова ћеш да се заглавиш, и хоће ли, када се заглавиш, ручица којом се врата могу отворити бити доступна. За неке који су је тражили срећа би била да никада нису осјетили њен хладни метални додир. Бројање станица током вожње на нашим солитерским ролеркостерима је било обавезно јер лако се путовање завршавало послје последње, а то већ није било забавно. Забавним се могло сматрати само када те лифт одлучи возати од спрата до спрата, насумично и ако имаш смисао за ту врсту хумора.

Када су још дјеца из солитера, што мог, што сусједних, открила како могу да заглаве лифт, на приземљу, елегантно потезући ручку од врата, па играчка није престајала. Несрећник који би се затекао у кабини лифта као жртва дјечачке јефтине забаве, могао је само да се моли да ће дјеци, као и свака друга играчка, и ова високо-технолошка брзо да досади. И досадила је, када смо одрасли.

Носећи у себи лифтове и као трауму и као најбоље пријатеље који те понесу таман када више немаш снаге ни да погледаш у једанаести спрат, дошло је вријеме да се дипломира. Шта изабрати као тему него аутоматизацију лифтова, болно мјесто, жива рана, једна од оних које још нису зарасле послје ратних олуја и мећава. Професорица др Србијанка Турајлић је прихватила идеју за тему али ја нисам имао идеју ни како да почнем а ни гдје да завршим. Срећом, и градска каса је почела да се опоравља и стаје на ноге, па се нашло вишка и да се ремонтују лифтови у граду. Сјајна прилика да се нешто научи и види око лифтова, а да није у мраку и под паучином.

Повезао сам се са дивним људима који су живот посветили да лифтове враћају у живот. Добри Љубиша Панчић и добри људи из Сингерице показали су ми и увели ме у свијет лифтова, открили тајне, показали што до тада видео нисам и захваљујући њима схватим да је моја тема за дипломски промашена. Не ради се аутоматизација лифта са програмабилним логичким контролерима као што сам ја мислио нити је аутоматизација лифтова нешто што бих ја први радио (а није скромно рећи да сам ја свој дипломски у том тренутку баш тако замишљао).

Благо разочаран, упитам, а заправо се пожалим, тада асистенту на Електротехничком факултету Миодрагу Симовићу. Он је радио као ревизор пројеката у Заводу за изградњу који се нажалост касније урушио као и моја идеја о аутоматизацији лифтова, па сам се надао да ће ме он некако навести да приђем лифтовима са праве стране, кроз врата на примјер, тј. кроз рачун, математику, папире, боље него кроз жице и вијке јер за то већ постоје стручњаци. Он ме је чак упознао и са неком Рајном која је имала фирму за изградњу и одржавање лифтова. Није ми то било од помоћи, жену нисам ни упамтио, али живот своје лифтове има па око десет година касније почнем радити

пројекте лифтова баш за ту Рајну, која ми је још увијек само непозната особа иза бајковитог имена.

Симовић ме упути да мало истражим трзај код лифтова. Он је то негдје прочитао, у некој збирци, има неки задатак. Ето, каже, код нас то нико не спомиње, ни у пројектима лифтова али могло би бити занимљиво. И тако почну прве трзавице, у мом дипломском раду. Трзамо се трзај и ја све до доктората, а и после, ево све до ове монографије. И није изгледно да ћемо на овоме стати. Дипломски рад са темом „Преглед савремених електромоторних погона лифтова и контрола трзаја који се јавља при кретању кабине лифта“ одбранио сам пред комисијом коју су чинили тада асистент, а данас проф. др Петар Матић, проф. др Милорад Божић и ментор проф. др Слободан Вукосавић, који је захваљујући већ унапредовалој технологији био у телевизору, тј. на Електротехничком факултету у Београду, а спајао нас је видео линк. У десетој глави монографије описан је математички модел који сам извео и објавио први пут у том свом дипломском раду.

Други циклус студија био је пауза од лифтова, пријекно потребна. У монографији нема ништа што је проистекло из периода студирања на другом циклусу али не бих себи опростио када не бих на оваквом мјесту споменуо свог ментора на завршном раду другог циклуса проф. др Миленка Ђурића код којег сам ипак остао на трагу погона и одбранио тему „Заштита нисконапонских асинхроних мотора од асиметричног напајања“.

Сав преостали садржај монографије је плод рада током докторских студија. Тему трзаја сам вратио на позорницу. Објавио сам са својим колегама професорима, проф. др Михајлом Стојчићем и проф. др Бранком Бланушом, неколико радова на тему различитих облика трзаја. Касније сам генерализовао функцију кретања са дефинисаним трзајем, објавио у истакнутом међународном часопису и ставио тачку на различите математичке моделе за различите облике. Извео сам један модел који покрива све могуће облике, па изволите, све је описано у петој глави.

Докторат није мачији кашаљ, поготово када за ментора изаберете проф. др Дарка Марчетића, који је докторирао код свјетски чувеног, и већ поменутог мог ментора са дипломског, професора Вукосавића. Додатна реклама није потребна.

Нема доктората без науке, нема науке без експеримента, нема експеримента без лабораторије. Направи лифт па се са њим играј. Умањени модел реалног лифта који је и сада у Лабораторији за мехатронику и роботiku као свједок, или тачније споменик минулим данима и ноћима (којима се не зна број) проведених у истраживању, је први лифт који сам пројектовао. Радне колеге и уједно другари помогли су да се експериментална апаратура направи. Колега и пријатељ проф. др Стево Боројевић, осим што је моделирао помагао ми је и да га окачим на зид. Њему је теже пало што

сам у бетону бушилицом наишао на арматуру него мени саоме, јер га је кући чекала трудна супруга Наташа, којој су минуте и сати трајали много дуже него нама, докторима наука у покушају. Експериментална апаратура описана је детаљно у седмој глави. Лично сам је лакирао, а два спаљена фреквенцијска регулатора нећу ни да спомињем, не знам ништа о томе нити куда је сав тај дим отишао.

Трзај сам апсолвирао, требало га је испробати на апаратури и ићи даље са планираним идејама за докторат али... мој лифт није радио. Реализовао сам брзинску регулацију са мојом референцом брзине са дефинисаним трзајем али лифт умјесто да је пратио референцу, само је стајао у мјесту и тресао се толико да, ако га хитно не бих искључио, конструкција би се убрзо распала. Нисам знао нити о чему је ријеч нити како да поправим то што не знам да је покварено. Након дужег размишљања нашао сам излаз на широка врата. Брзински регулатор који сам користио преузео сам, од трећи пут поменутог професора Вукосавића. Давно је он, заједно са доајеном аутоматског управљања на београдском Електротехничком факултету, проф. др Милићем Стојићем, свјетској јавности представио свој оптимални регулатор брзине. Детаљно га је описао и у својим књигама, од којих сам ја користио баш ону на енглеском јер ми је у списку литературе звучала моћније. И ето рјешења. Прогласио сам, мирне душе и усијане главе, да Вукосавићев регулатор не ради. Тако је. Тај регулатор ради само у његовим књигама. Срећа па то нисам причао на глас.

Након мало дужег размишљања од овог претходног закључио сам о чему је заиста ријеч. Лифт, услед еластичне структуре, прије свега челичних ужади, у интеракцији са остатком конструкције коју чини и погонски мотор, има резонантну фреквенцију коју сам ја случајно погодио. Погодио сам је јер је брзински регулатор, напротив, био јако добар па му је и фреквенцијски спектар био богат. У том богатству била је и резонантна фреквенција лифта која је учинила оно што учине војници ако марширају на мосту или што је Тесла учинио на зградама око своје лабораторије, а касније и са полицајцима на плочи (свака сличност са Теслом је случајна, са полицајцима такође).

Открио сам узрок, пронашао сам и рјешење. Осмислио сам антирезонантни филтер који треба да се подеси на резонантну фреквенцију. Филтер све што брзински регулатор форсира у систем пропушта, осим фреквенције која је за систем фатална. Звучи једноставно, можда и јесте али како знати која је резонантна фреквенција лифта, сигурно није. Пролазили су дани и мјесеци, не би их сада пребројавао да ова соната не склизне у Д мол, али и томе се нашло лијека. У науци, као и у животу, увијек послје кише долази сунце и нада умире посљедња.

Пронашао сам начин како се може аутоматски одредити резонантна фреквенција и, још боље, како се може аутоматски подесити антирезонантни филтер. Све сам описао у свјетским научним часописима и у четвртој, шестој и осмој глави монографије.

Лифтове сам, као што се види, озбиљно схватио. Данас се бавим њиховим пројектовањем, са више или мање трзаја и вибрација. Од пројектовања сам зарадио нешто више него од науке, али далеко мање од неких који су се лифтовима много мање возили од мене, а још мање у њима заглављивали.

Да би прича имала заокружену цјелину и да не би математика остала гола и неушушкана теоријом препуштена оштрим вјетровима критике који научни резултат мјере метром и бројем страна, у трећој глави сам систематизовано описао лифт као мехатронички систем, показао гдје му је реп а гдје глава. Све сам добро подбочио у другој глави анализом туђих резултата у овој области тежећи да покажем како сам ја ту ипак издоминирао. Тако сам научио читајући туђе прегледе и анализе литературе, да не кажем state-of-the-art.

Ниједан човјек није окресана грана као што и иза сваког успјешног резултата стоји брдо неуспјеха али и добрих људи, пријатеља, колега, ментора. Захваљујем се свима које сам споменуо у овом предговору јер да није било њих не би било ни предговора, ни монографије, као ни резултата.

Парадокс је да они који нису споменути су и најврједнији и њима дугујем највише. То су они које сваки мој успјех радује, а неуспјехе и грешке ми са лакоћом опраштају. Много лакше него ја њима. Родитељи, сестра, супруга као и они који су нам се са временом прикључили, али и они којима још нисмо ни име дали, сви они о овоме не знају ништа. Неразумљив наслов, још неразумљивији садржај, ако ме не извуче предговор и љепушкаст дизајн корица, биће да сам залуд трошио вријеме. Али баш због тога, њима се највише захваљујем јер они ме воле и када ме не разумију.

У мом родном граду,
љета Господњег 2022.

доц. др Бојан З. Кнежевић



...Љубав никад не пресѣјаје,
 док ће пророшѣва несѣаши, језици ће замукнуши,
 знање ће пресѣаши.

Јер дјелимично знамо, и дјелимично пророкујемо;
 А када дође савршено, онда ће пресѣаши што је дјелимично...

(1 Kor. 13)

САДРЖАЈ

1. Увод	1
2. Стање у области истраживања	8
2.1. Преглед литературе у области вибрација.....	8
2.2. Преглед литературе у области управљања трзајем	10
3. Математичко моделовање мехатроничког система лифта	14
3.1. Опис електричног лифта.....	14
3.2. Математички модел механичког подсистема МСЛ-а	16
3.3. Математички модел погонског подсистема МСЛ-а.....	20
3.4. Математички модел индиректног векторског управљања	22
3.5. Управљање брзином и положајем МСЛ-а	24
4. Сузбијање вибрација у мехатроничком систему лифта.....	27
4.1. Појава вибрација у МСЛ-а.....	27
4.2. Филтер за сузбијање вибрација у МСЛ-а.....	29
4.3. Предложена процедура за подешавање антирезонантног филтера.....	31
5. Трајекторија брзине са дефинисаним трзајем	38
5.1. Дефиниција и облици трзаја у МСЛ-а.....	38
5.2. Генерализовани модел референце брзине дефинисан трзајем.....	42
6. Антирезонантна управљачка шема са контролом трзаја мехатроничког система лифта	56
7. Опис експерименталне апаратуре.....	58
7.1. Управљачки ДСП подсистем мехатроничког система лифта	58
7.1.1.Поређење ДСП-а са аритметиком фиксне и покретне тачке	58
7.1.2.Дигитални сигнал процесор са окружењем	62
7.2. Погонски подсистем МСЛ-а.....	63
7.2.1.Енергетски претварач.....	64
7.2.2.Прилагодна кола.....	71
7.3. Механички подсистем МСЛ-а.....	75
7.4. Параметри и додатна израчунавања и умјеравања за експерименталну апаратуру	78
7.4.1.Параметри МСЛ-а	78
7.4.2.Мјерење брзине и параметри регулатора брзине	79

7.4.3. Мјерење напона једносмјерног међукола	79
7.4.4. Мјерење линијских и израчунавање магнетизационе и активне компоненте струје статора, i_{sd} и i_{sq}	80
7.4.5. Струјни лимити и одређивање номиналне вриједности струје магнећења, i_{sdn}	82
8. Резултати провјера предложених рјешења	85
8.1. Експериментални резултати предложених алгоритама за сузбијање вибрација у мехатроничком систему лифта	85
8.2. Експериментални резултати предложене регулације брзине са контролисаним трзајем	94
9. Унапријеђени брзински и струјни регулатори	100
9.1. Дигитални регулатор који обезбјеђује робусно праћење трајекторије са контролисаним трзајем	100
9.2. Нови аналитички приступ за пројектовање регулатора струје и брзине	103
9.2.1. Пројектовање регулатора струје	106
9.2.2. Пројектовање регулатора брзине	108
9.2.3. Резултати симулација	110
9.2.4. Резултати експеримената	114
10. Остале методе генерисања трајекторије брзине са дефинисаним трзајем	117
10.1. Трзај константне вриједности	117
10.2. Трзај синусног облика	123
11. Закључна разматрања	127
12. Литература	133