



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ



Вукашин Д. Павловић

**РАЗВОЈ И УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ
СИСТЕМА ВЕЗЕ ИЗМЕЂУ ФИЗИЧКИ ПОВЕЗАНИХ
РОБОТА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2023.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL
ENGINEERING



Vukašin D. Pavlović

**DEVELOPMENT AND CONTROL OF AN
INTELLIGENT CONNECTION SYSTEM BETWEEN
PHYSICALLY CONNECTED ROBOTS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2023.

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	др Милош Симоновић, ванредни професор, Универзитет у Нишу, Машински факултет
Наслов:	Развој и управљање интелигентног система везе између физички повезаних робота
Резиме:	<p>Дигиталне технологије и сервиси нуде нове могућности за трансформацију различитих сектора. У годинама које долазе, један од кључних сектора који ће доживети револуцију је сектор производње хране. Примена дигиталних технологија треба да допринесе решавању глобалног проблема производње хране. Једна од иновација у овој области је усмерена на примену робота и роботизованих система, кроз удруживање робота у рој како би заједно извршили неки сложен задатак.</p> <p>Предмет докторске дисертације је развој и управљање интелигентног система везе између физички повезаних робота. Систем се састоји од четири физички повезана робота помоћу ужади које чине ограду. За потребе одржавања одређене силе затегнутости ужета, развијен је подсистем за затезање ужета као и управљање на бази вештачке интелигенције. Примена овако развијеног подсистема је један од предуслова који омогућава управљање формацијом целог система. Рад развијеног подсистема је тестиран у оквиру различитих експеримената на терену кроз реалне сценарије и доказана је његова примењивост.</p>
Научна област:	Мехатроника и управљање системима
Научна дисциплина:	Мехатроника
Кључне речи:	Физички повезани роботи, управљање затезањем, вештачке неуронске мреже, роботика, пољопривреда
УДК:	62-505:[007.52:004.896(043.3)]
CERIF класификација:	T 125 Аутоматизација, роботика, контролни инжењеринг
Тип лиценце Креативне заједнице	CC BY-NC

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Dr Miloš Simonović, associate professor, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering
Title:	Development and control of an intelligent connection system between physically connected robots
Abstract:	<p>Digital technologies and services offer new opportunities for the transformation of various sectors. In the years to come, one of the key sectors that will experience a revolution is the food production sector. The application of digital technologies should contribute to solving the global problem of food production. One of the innovations in this area is focused on the application of robots and robotic systems, by joining robots in a swarm to perform a complex task together.</p> <p>The subject of the doctoral dissertation is the development and control of an intelligent connection system between physically connected robots. The system consists of four robots physically connected by polywires that form a fence. For the purpose of maintaining a certain polywire tension force, a polywire tensioning subsystem was developed as well as control based on artificial intelligence. Application of the subsystem developed in this way is one of the prerequisites that enables the formation control of the entire system. The work of the developed subsystem was tested in various field experiments through real scenarios and its applicability was proven.</p>
Scientific Field:	Mechatronics and Control Systems
Scientific Discipline:	Mechatronics
Key Words:	Physically Connected Robots, Tension Control, Artificial Neural Networks, Robotics, Agriculture
UDC:	62-505:[007.52:004.896(043.3)
CERIF Classification:	T 125 Automation, robotics, control engineering
Creative Commons License Type:	CC BY-NC

Захвалност аутора

Ова докторска дисертација је урађена на Катедри за мехатронику и управљање, Машинског факултета у Нишу. Истраживања која су предмет ове дисертације су финансијски подржана од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (Уговор бр. 451-03-47/2023-01/200109) и истраживачко-иновационог пројекта „RoboShepherd - аутоматизовани систем за чување и гајење крда“ (IF ID 50123) из Програма сарадње науке и привреде који су финансирани Фонд за иновациону делатност Републике Србије и COMING – Computer Engineering d.o.o, Београд.

Захваљујем свом ментору проф. др Милошу Симоновићу на усмеравању, сталном подстицању и саветима током израде докторске дисертације.

Захваљујем се на пружању помоћи у извођењу експерименталног истраживања члановима тима пројекта RoboShepherd, проф. др Милану Банићу, проф. др Александру Милтеновићу и асистенту Миши Томићу који су посебним ангажовањем дали значајан допринос мојој дисертацији. Велику помоћ су ми пружили и остали чланови тима, проф. др Властимир Николић, проф. др Никола Корунковић, проф. др Никола Витковић, Душан Крстић, као и млађе колеге које су учествовале у реализацији пројекта.

Посебну захвалност дугујем проф. др Милошу Милошевићу који је пратио моје научно и професионално сазревање и у њему имао значајну улогу. Хвала на саветима, мотивацији и подршци током свих ових година.

Захваљујем се проф. др Ненаду Т. Павловићу на подршци, доц. др Александри Цветковић на саветима и корисним сугестијама при коначном обликовању докторске дисертације, свим члановима Катедре за мехатронику и управљање, као и многобројним колегама које су ми на различите начине помагале.

На крају, највећу захвалност дугујем својој породици и супрузи Јовани, без чије подршке, одрицања и разумевања ова дисертација не би била могућа.

*„Све има своје време и свака намера под небом има своје време:
време рађања и време умирања, време сађења и време чупања посађеног,
време убијања и време лечења, време рушења и време зидања,
време плакања и време смејања, време туговања и време плесања,
време бацања камења и време скупљања камења, време грљења и време
престанка грљења,
време тражења и време губљења, време чувања и време одбацивања,
време цепања и време шијења, време ћутања и време говорења,
време љубави и време мржње, време рата и време мира.“*

Књига Проповедникова 3, 1-8¹

¹ Превод са старојеврејског језика проф. др Драган Милин, Свето писмо Старог и Новог завета, Библијско друштво Србије, 2022.

Садржај

1.	Увод.....	1
1.1	Предмет истраживања	3
1.2	Циљ истраживања.....	4
1.3	Структура рада.....	5
2.	Примена аутономних система у пољопривреди.....	7
2.1	Виртуелне електричне ограде	8
2.2	Покретна ограда за испашу	11
2.3	Примена дрона за управљање испашом	12
2.4	Роботизовани системи за испашу.....	13
3.	Физички повезани роботи	15
3.1	Физички повезани роботи са крутом везом	17
3.2	Физички повезани роботи са еластичном везом	18
4.	Примена концепта електричне ограде	20
4.1	Типови електричних ограда	21
4.1.1	Сталне електричне ограде.....	22
4.1.2	Преносне електричне ограде.....	24
4.2	Електрични проводник	26
4.3	Напајање електричне ограде	29
4.4	Стубови, шипке за земљу и изолатори.....	30
5.	RoboShepherd – интегрисани систем физички повезаних робота	32
5.1	Идејно решење.....	33
5.2	Функционални захтеви	37
6.	Конструисање роботске јединице	40
6.1	Покретна платформа роботске јединице.....	40
6.2	Подсклоп за ослањање подсистема за затезање физичке везе	45
6.2.1	Нагиб подскопа за ослањање подсистема за затезање физичке везе.....	45
6.2.2	Ротација подскопа за ослањање подсистема за затезање физичке везе	48
6.2.3	Конструисање подскопа за ослањање подсистема за затезање физичке везе ..	49
7.	Подсистем везе роботских јединица.....	53
7.1	Конструисање подсистема за затезање ужета	55
7.2	Одређивање потребне силе затезања ужета	58
7.3	Испитивање механичких карактеристика ужета	60
7.4	Систем за аквизицију података.....	65

7.4.1	Систем за аквизицију података за подсистем за затезање ужета	67
7.4.2	Тестирање система за аквизицију података за подсистем за затезање ужета	71
8.	Валидација структурних компоненти и прорачун превртања роботске јединице	73
8.1	Валидација структурних компоненти	73
8.2	Прорачун превртања роботске јединице	78
9.	Интелигентно управљање подсистемом везе роботских јединица	84
9.1	Пројектовање система управљања подсистема везе	85
9.2	Технике вештачке интелигенције	90
9.2.1	Вештачка интелигенција и роботика	92
9.2.2	Вештачке неуронске мреже	95
9.3	Прикупљање и обрада података за развој интелигентног управљања подсистема везе роботских јединица	101
9.4	Вештачка неуронска мрежа за предвиђање силе у ужету	104
10.	Закључак	111
	Литература	113
	Биографија	123

Списак скраћеница

3Г/4Г/5Г	трећа, четврта и пета генерација мобилне мреже
ADALINE	Adaptive Linear Element
AI	Artificial Intelligence
ANFIS	Adaptive Neuro Fuzzy Interference System
ANN	Artificial Neural Network
ARM	Advanced Reduced Instruction Set Computer Machines
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
CAD	Computer Aided Design
FL	Fuzzy Logic
GA	Genetic Algorithms
GPS	Global Positioning System
GPRS	General Packet Radio Service
IMU	Inertial Measurement Unit
LoRa	Long Range Radio
MRS	Multi-robot Systems
PLA	Polylactic Acid
PID	Proportional Integral Derivative
PLC	Programmable Logic Controller
PLF	Precision Livestock Farming
PSO	Particle Swarm Optimization
PWM	Pulse Width Modulation
RFID	Radio-frequency Identification
RJ	Роботска јединица
RS	Задата позиција роботске јединице током кретања
RTK	Real Time Kinematics
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UGV	Unmanned Ground Vehicle

Списак слика

Слика 2.1 Виртуелна електрична ограда.....	9
Слика 2.2 Систем виртуелне електричне оgrade доступан на тржишту	10
Слика 2.3 Покретна ограда.....	11
Слика 2.4 Дрон-пастир	12
Слика 2.5 „Voyager“ аутоматски систем за контролу испаше	13
Слика 2.6 Идејно решење роботизоване електричне оgrade.....	14
Слика 3.1 Позиција у формацији одређена различитим референтним техникама	16
Слика 4.1 Електрична ограда	21
Слика 4.2 Електрична ограда код које се струјно коло затвара преко земље	22
Слика 4.3 Електрична ограда код које се струјно коло затвара преко оgrade.....	23
Слика 4.4 Биполарни тип електричне оgrade	24
Слика 4.5 Преносна електрична ограда	25
Слика 4.6 Електрични проводници	26
Слика 4.7 Препоручена висина и густина електричне оgrade према врсти животиње ..	28
Слика 4.8 Биполарни уређај који даје импулсну струју	30
Слика 4.9 Изолатори	31
Слика 5.1 Фазе развоја система RoboShepherd.....	33
Слика 5.2 Кретање система до пашњака.....	35
Слика 5.3 Веза две роботске јединице	36
Слика 6.1 CAD модел пројектоване роботске јединице.....	40
Слика 6.2 CAD модел рама, подсклопова тачкова и провидни приказ штита	41
Слика 6.3 Подсклоп рама	42
Слика 6.4 Подсклоп тачка - CAD модел и израђени подсклоп тачка	43
Слика 6.5 Промена висине роботске јединице	44
Слика 6.6 Подешавање нагиба са 2 линеарна актуатора	46
Слика 6.7 Подешавање нагиба са 3 линеарна актуатора	46
Слика 6.8 Стјуартова платформа	47
Слика 6.9 Корекција нагиба у подужном правцу.....	48
Слика 6.10 Корекција нагиба у бочном правцу.....	48
Слика 6.11 CAD приказ вертикалног стуба у две пројекције	50
Слика 6.12 CAD приказ куполе са електронским компонентама.....	51
Слика 6.13 Спој вертикалног носећег стуба и рама.....	52
Слика 6.14 Подсклоп вертикалног носећег стуба	52
Слика 7.1 Шематски приказ подсистема за затезање ужета	55
Слика 7.2 Подсистем за затезање ужета	56
Слика 7.3 Фото-реалистичан приказ уређаја за затезање ужета.....	57
Слика 7.4 Одређивање силе затезања ужета.....	58
Слика 7.5 Уже и мерна скала	58
Слика 7.6 Дијаграм сила – угиб	59
Слика 7.7 Уже за електричну ограду - Farmline Dragon.....	60
Слика 7.8 Почетак испитивања ужета са постављеним тензометром.....	61
Слика 7.9 Тест бр. 1 - Дијаграм сила - издужење.....	61
Слика 7.10 Тест бр.1 - Уже након пуцања	62
Слика 7.11 Тест бр. 1 - Дијаграм напон – дилатација.....	62
Слика 7.12 Тест бр. 4 - Дијаграм сила – дилатација	63
Слика 7.13 Тест бр. 6 - Дијаграм сила - дилатација	64
Слика 7.14 Блок дијаграм локалног система за аквизицију података	67
Слика 7.15 GPS модул са антенама монтиран на роботској јединици.....	68

Слика 7.16 Сензори.....	69
Слика 7.17 Инерцијална мерна јединица монтирана на средини роботске јединице.....	69
Слика 7.18 Графичко корисничко окружење за систем за аквизицију података	70
Слика 7.19 Промена удаљености између роботских јединица	71
Слика 7.20 Промена струје мотора током затезања ужади	72
Слика 7.21 Промена силе у пару ужади током теста	72
Слика 8.1 Упрошћени и дискретизовани геометријски модел вертикалног носећег стуба	74
Слика 8.2 Задата оптерећења на вертикалном носећем стубу	75
Слика 8.3 Деформација вертикалног носећег стуба	75
Слика 8.4 Напонско стање вертикалног носећег стуба при радном оптерећењу.....	76
Слика 8.5 Максимални напон на вертикалној вођици.....	76
Слика 8.6 Степен сигурности.....	77
Слика 8.7 Природне фреквенције подскопа вертикалног носећег стуба одређене фреквентном анализом у оптерећеном стању	77
Слика 8.8 Оптерећења услед сила затезања ужади.....	78
Слика 8.9 Правоугаони облик RoboShepherd система.....	79
Слика 8.10 Положај ужади под углом $\alpha = 90^{\circ}$	79
Слика 8.11 Дејство сила на роботску јединицу.....	80
Слика 8.12 Формација са оштрим углом између роботских јединица.....	81
Слика 8.13 Положај ужади под углом $\alpha < 90^{\circ}$	81
Слика 8.14 Дејство сила када је роботска јединица на терену под нагибом	82
Слика 9.1 Блок дијаграм управљања подсистема за затезање ужета	85
Слика 9.2 Лабораторијско испитивање управљања подсистема за затезање ужета	85
Слика 9.3 Испитивање управљања подсистема за затезање ужета у контролисаним условима.....	86
Слика 9.4 Почетна позиција и кретање роботских јединица	86
Слика 9.5.Измерена сила у пару ужади током мировања роботских јединица.....	88
Слика 9.6 Измерена сила у пару ужади између роботских јединица RJ1 и RJ2 током приближавања	88
Слика 9.7 Измерена сила у пару ужади између роботских јединица RJ1 и RJ2 током удаљавања.....	89
Слика 9.8 Директни интелигентни систем управљања	93
Слика 9.9 Индиректни интелигентни систем управљања	94
Слика 9.10 Биолошки неурон.....	96
Слика 9.11 Вештачка неуронска мрежа са једним скривеним слојем.....	99
Слика 9.12 Модел вештачког неурона	100
Слика 9.13 Фазе извођења експеримента са животињама	102
Слика 9.14 Путање роботских јединица током тестова.....	103
Слика 9.15 Roboshepherd систем током тестирања са животињама.....	103
Слика 9.16 Roboshepherd систем – различите формације	104
Слика 9.17 Roboshepherd систем – долазак на пашњак.....	104
Слика 9.18 Вештачка неуронска мрежа	106
Слика 9.19 Средња квадратна грешка током процеса тренирања ANN	107
Слика 9.20 Дијаграм тока вештачке неуронске мреже.....	108
Слика 9.21 Резултати перформансе мреже за обуку, валидацију и тестирање	109
Слика 9.22 Предложено управљање подсистемом затезања ужета на бази ANN.....	109
Слика 9.23 Развој интелигентног система управљања за предвиђање силе у ужади	110

Списак табела

Табела 1 Списак функционалних захтева и спецификација	37
Табела 2 Параметри испитивања угиба ужета наспрам силе затезања	59
Табела 3 Параметри испитивања ужета	60
Табела 4 Подаци добијени током тестова	105

1. Увод

Константан развој и примена дигиталних технологија утичу на промену живота, економију као и културу друштва. Информационо комуникационе технологије у виду широкопојасног интернета, рачунара, бежичних и мобилних мрежа су омогућиле креирање дигиталних мрежа кроз које стално протичу велике количине информација. За разлику од претходних технолошких револуција, информација је данас централна компонента око које се технологија позиционира. Може се рећи да цео свет пролази кроз једну врсту дигиталне трансформације где све постаје повезано. Ово резултира новим начинима пословања, комуникацијама и управљањем у различитим друштвеним доменима [1], [2] при чему технологију не треба посматрати кроз просту аутоматизацију процеса, већ као отварање путева ка новим начинима за побољшање животних услова, где примена дигиталних технологија у секторима попут индустрије, производње хране, заштите животне средине, медицине и другим, омогућава одрживост на светском нивоу.

Одрживи свет захтева одрживу пољопривредну индустрију која производи довољно хране да прехрани светску популацију која се повећава свакога дана. Процена је да ће до 2050. године глобална производња хране морати да се повећа за око 60% [3]. Све већа потреба за храном такође захтева да се дневно производи више млека, меса и других прехранбених производа. Константан раст потребе за храном ставља велике изазове пред сточарство које као део пољопривреде учествује у производњи хране са око 20% на светском нивоу, и као такво има велики утицај на квалитет живота у целом свету. Међутим, за успех сточарства неопходно је испунити више услова. На првом месту потребно је омогућити адекватну испашу стоке. За испашу стоке најчешће се ангажују пастири који да би обављали овај посао, морају бити одговорни и вољни да раде у тешким условима. Међутим, у данашње време, упркос високим платама, може бити веома тешко пронаћи људе који су спремни да раде као пастири. Потенцијални радници који покушавају да раде као пастири често брзо одустају од оваквих послова због потребе специфичних вештина, високе одговорности и тешких услова рада (као што су на пример временски услови). Поред тога, ефикасност сточарства зависи и од стања пашњака. Ако се животиње стално држе на једном месту дуже време, оне ће јести вегетацију само са ограниченог простора, трава и биљке ће бити уништене због сталног гажења што ће постепено довести до проблема да пашњак неће моћи да се опорави услед ерозије земљишта. Стога, управљање пашњацима није лак задатак, јер стоку треба

стално премештати да би се биљке регенерисале и водити рачуна како се не би умањило укупан квалитет пашњака. Такође, стоку треба заштитити од природних предатора, који неретко услед недостатка хране нападају стада на испаши. Сви ови проблеми ограничавају број фармера спремних да улажу у сточарство, јер је то често неисплативо пошто производи који се добијају узгајањем стоке, попут млека и меса, не могу фармерима да обезбеде довољне добитке гледано са економске стране.

Пошто је одржива производња хране постала глобални проблем, широм света се спроводе истраживања о иновацијама у пољопривреди кроз синергију индустрије и пољопривреде. Иновације у пољопривредној индустрији су значајне, посебно у области сточарства јер је процена да се око 77% светског пољопривредног земљишта користи за сточарство. Недостатак радне снаге довео је до примене робота и роботизованих система у пољопривредном сектору. Иновативна решења имају за циљ да применом робота и роботизованих система помогну развоју сточарства кроз разне облике у виду роботизованих музилица, хранилица, обављању послова пастира и на сличне начине. Такође, примена робота у пољопривредно-прехранбеном сектору је један од стратешких приоритета у свим дугорочним плановима озбиљнијих држава.

Поред једноставне примене робота, где један робот извршава један или више задатака сукцесивно, могуће је више истих робота координисати како би они извршили неки сложен задатак. Код оваквих роботских система, иако је сваки робот појединачно аутономан, тежи се удруживању у рој робота како би се омогућило решавање комплекснијих задатака са којима сваки робот појединачно не би могао да се носи, нпр. због сопствених физичких ограничења. Код роја робота се тежи децентрализацији управљања при чему постоји комуникација између роботских јединица, што чини систем робуснијим са аспекта извршавања задатка. Поред тога, када су роботи физички повезани, проблем координације представља додатни изазов. Поред саме координације кретања и извршавања задатака подсистем физичке повезаности робота мора у реалном времену да одговори на захтев оптималног одржавања физичке везе. У стручној и научној литератури која се бави проблематиком физички повезаних робота истраживања су углавном базирана на испитивањима лабораторијских прототипова или симулацијама система.

1.1 Предмет истраживања

Предмет научног истраживања ове докторске дисертације је развој и управљање одређеним подсистемима физички повезаних робота који се користе као самоходни систем за испашу у виду покретне ограде. Самоходни систем за испашу је систем у виду роботског роја који има функцију покретне полигоналне електричне ограде која окружује сточне животиње у пољу или их приморава да се крећу дуж унапред дефинисане путање. Овај систем треба да омогући извођење и враћање стада са испаше уместо пастира. Разматра се систем који се састоји од најмање четири роботске јединице, односно четири покретна стуба који су физички повезани. Физичка веза је остварена вишеслојним уплетеним ужетом које се састоји од пластичних нити и металних жица постављених на више различитих висина, а кроз које се пушта импулсна струја и на тај начин формира електрична ограда. Успостављањем физичке везе на овакав начин, добија се систем физички повезаних роботских јединица чијим кретањем треба формацијски управљати. Како би се омогућило управљање кретањем целог система потребно је управљати физичком везом између роботских јединица, којом се управља преко подсистема за затезање ужета. Главна функција овог подсистема је одржавање одређене силе затегнутости у ужету намотавањем или одмотавањем ужета као и омогућавање различитих формација целог система. Подсистем за затезање ужета се састоји од сензора силе који се налази на једној роботској јединици и котурова са управљачком јединицом који се налазе на другој роботској јединици. Уже се намотава или одмотава са котурова при чему сензор детектује и шаље информацију о сили у ужету до управљачке јединице. Развијени управљачки алгоритам прати силу у ужету и по потреби се уже затеже или попушта. На иницијалним тестовима је установљено да овакав начин управљања подсистемом за затезање ужета добро функционише кад је систем у стању мировања. Међутим, приликом кретања роботских јединица по теренима различитог рељефа, управљачки алгоритам није увек у могућности да одговори на адекватан начин у реалном времену, односно може доћи до недовољне или претеране затегнутости ужета. Услед недовољне затегнутости ужета може се десити да животиње пробију ограду и напусте систем, док приликом претеране затегнутости ужета може доћи до превртања роботске јединице. Због свега наведеног, истраживања у оквиру докторске дисертације ће обухватити више праваца који се односе на анализу могућих решења и развој подсистема за затезање ужета. Управљање подсистемом за затезање ужета, које треба да омогући формацијско управљање кретања роботских јединица у

реалном времену кроз исправан рад самог подсистема за затезање ужета, биће део истраживања ове докторске дисертације. У оквиру рада посебна пажња биће посвећена развоју интелигентног подсистема за затезање ужета на бази вештачке интелигенције који ће омогућити предвиђање силе затезања у ужету. Највећа предност интелигентног управљања је могућност система да одреагује на промену пре него што се она деси, што примењено на подсистем за затезање ужета значи могућност да подсистем крене да затеже или попусти унапред, односно подсистем ће кренути са радом када процени да ће доћи до промене која може да угрози рад целог система.

1.2 Циљ истраживања

Кључни циљ истраживања је развој и управљање интелигентног система везе између физички повезаних робота и њихова интеграција у самоходни систем за испашу.

Основни циљеви истраживања су:

- Прикупљање података за развој подсистема за затезање физичке везе;
- Разрада методологије ради предвиђања услова при којима могу настати проблеми у току експлоатације;
- Развој и реализација подскопа за ослањање подсистема за затезање физичке везе;
- Развој и реализација подсистема за затезање физичке везе;
- Разрада методологије експерименталног испитивања развијеног подсистема у реалним условима експлоатације;
- Селекција кључних параметара који утичу на формацијско управљање целим системом и њихова анализа и праћење у току експлоатације.
- Предикција силе у физичкој вези коришћењем вештачких неуронских мрежа и развој алгорита за оптимално оптерећење физичке везе.

Реализацијом задатих циљева треба да се омогући имплементација развијеног подсистема као и управљања подсистемом за затезање ужета као неопходног дела самоходног система за испашу што ће омогућити употребу овог система приликом узгајања стоке што ће потенцијално решити проблем недостатка пастира и омогућити пољопривредницима да коришћењем роботизованих система узгајају већи број животиња и производе више хране.

1.3 Структура рада

Дисертација се састоји од увода, осам поглавља, закључних разматрања, списка коришћене литературе и прилога. Садржај текста дисертације изложен је кроз поглавља:

1. Увод
2. Примена аутономних система у пољопривреди
3. Физички повезани роботи
4. Примена концепта електричне ограде
5. RoboShepherd – интегрисани систем физички повезаних робота
6. Конструисање роботске јединице
7. Подсистем везе роботских јединица
8. Валидација структурних компоненти и прорачун превртања роботске јединице
9. Интелигентно управљање подсистемом везе роботских јединица
10. Закључак

У првом поглављу су дата уводна разматрања и напомене о предмету и циљу истраживања. У оквиру другог поглавља је дат преглед примене аутономних система у пољопривреди са посебним акцентом на технологије прецизног сточарства које се тренутно користе или развијају за потребе пољопривреде. Описани су различити роботизовани системи који служе да воде животиње на испашу, контролишу испашу и враћају животиње са испаше. У трећем поглављу је објашњен систем физички повезаних робота са посебним освртом на групу код које је успостављена физичка веза између робота. У четвртом поглављу су описани различити типови електричних ограда које се користе у сточарству како би се ограничавало кретање животиња. У овом поглављу је објашњен начин на који се конструира електрична ограда, описани су саставни делови и напајање. Изложено је и више начина за затварање струјног кола када животиња додирне ограду. Такође, дат је преглед потребне висине ограде у односу на животиње које се ограђују.

У петом поглављу су дати идејно решење и функционални захтеви потребни за развој интегрисаног система физички повезаних робота – RoboShepherd. У овом поглављу су у оквиру идејног решења описани подсистеми од којих се састоји RoboShepherd. У шестом поглављу је приказан развој роботских јединица и приказана је испројектована покретна платформа. Поред тога, приказана су могућа решења за нагиб и ротацију подскопа за ослањање подсистема за затезање физичке везе. У наставку је

дат детаљан приказ испројектованог подсклопа за ослањање подсистема за затезање физичке везе са саставним деловима и компонентама, као и начин спајања са покретном платформом.

У седмом поглављу је приказан подсистем везе роботских јединица. Изложена је развијена веза роботских јединица у виду подсистема за затезање ужета са приказом испројектованог подсклопа, саставних делова и компоненти. Урађено је и више испитивања како би се одредила потребна сила затезања ужета, као и понашање ужета током експлоатације. У наставку је објашњен систем за аквизицију података који је пројектован за потребе система RoboShepherd.

У осмом поглављу је урађена анализа методом коначних елемената у циљу валидације пројектованих склопова, подсклопова и компоненти система RoboShepherd. У овом поглављу је дат и прорачун стабилности роботске јединице како би се спречило превртање исте. У деветом поглављу су изложене технике вештачке интелигенција, као и њихова употреба у роботици са посебним освртом на вештачке неуронске мреже. Такође је приказано пројектовано традиционално управљање подсистема за затезање ужета, које је тестирано кроз више сценарија кретања целог система, а на основу прикупљених података је пројектовано и интелигентно управљање. У овом поглављу су приказани и резултати истраживања као и тестирање RoboShepherd система са животињама.

У десетом поглављу су дата закључна разматрања, сумирани резултати истраживања и предложени даљи правци истраживања.

На крају је дат списак коришћене литературе.

2. Примена аутономних система у пољопривреди

Пољопривреда је једна од најперспективнијих области за примену дигиталних технологија. Као кључни сектор привреде многих земаља у развоју, пољопривреда обезбеђује значајан раст у глобалној економији. Данас, савремену пољопривреду карактерише висок удео коришћења нових технологија, како у производном процесу, тако и у инфраструктури која има виталну улогу у сваком кораку пољопривредне производње. Употреба нових дигиталних технологија је могућа захваљујући развоју и технолошкој модернизацији процеса пољопривредне производње. Нова средства производње која се користе у пољопривреди одликује присуство високо интелигентних уређаја који смањују трошкове у производном процесу док истовремено доприносе побољшању ефикасности самог процеса [4].

Дигиталне технологије и сервиси, у виду 5Г мрежа, интернета ствари, рачунарства у „облаку“ и других, нуде нове могућности за трансформацију пољопривредног сектора. Применом дигиталних технологија се омогућава развој пољопривредних база података, смањење загађења животне средине, повећава безбедност пољопривредних производа, постиже очување ресурса и еколошка прихватљивост [5]. Може се рећи да примена дигиталних технологија доводи до пољопривредне револуције у којој се традиционална пољопривреда трансформише у дигиталну пољопривреду. Ова трансформација захтева огромну количину података из готово свих фаза ратарске, рибарске и сточарске производње. Дигитална пољопривреда је холистички приступ који користи знања из информационих наука, науке о животној средини, рачунарског и софтверског инжењерства, географског информационог система, глобалног система за позиционирање као и информације са различитих сензорских мрежа и сателитских снимака, како би се реализовао цео процес трансформације кроз праћења, управљања и контроле, чиме се унапређује рад и управљање пољопривредом и повећава продуктивност [6], [7].

Очекује се да примена дигиталних технологија посебно помогне развоју сточарства као једном од сектора пољопривреде чија је будућност неизвесна због значајног доприноса загађењу воде и ваздуха, губитка биодиверзитета, као и етичких недоумица са становишта добробити животиња. Претерана употреба травњака за испашу је довела до тога да се на многима од њих јавља неки степен деградације [8]. Деградација травњака изазива низ проблема, укључујући уништавање вегетације, повећање ерозије земљишта, промене у фауни и др. [9]. Иако постоје докази да смањење

сточарске производње може позитивно утицати на екологију, сточарство има позитивну улогу и у агроекосистемима као и у прехрани људске популације [10]. У потрошњи на глобалном нивоу животињски производи учествују са 18% калорија и 25% протеина, при чему се тренутно трећина обрадиве земље користи за производњу хране за животиње [11]. Како би се решили ови проблеми у сточарство се уводе дигиталне технологије које треба да помогну у заштити усева, контроли пашњака и управљању испашом.

Примена дигиталних технологија у оквиру прецизног сточарства PLF (*енгл. Precision Livestock Farming*) је омогућила да се стекну нова сазнања о понашању животиња као и да се повећа добробит животиња. Прецизно сточарство обухвата комбиновану примену различитих технологија и уређаја за праћење животиња у реалном времену, при чему је могуће пратити појединачне параметре сваке животиње, нпр. температуру или групне параметре као што је локација крда на испаша [12].

Технологије прецизног сточарства имају велику примену код управљања испашом. Посебна пажња се поклања истраживањима у оквиру примена ових технологија за развој решења различитих уређаја који треба да воде животиње на испашу, контролишу испашу и враћају животиње са испаше. У научној и стручној литератури се могу наћи решења у оквиру којих се за управљање испашом предлаже употреба:

- Виртуелних електричних ограда;
- Покретних ограда;
- Дронова;
- Роботизованих система за испашу.

2.1 Виртуелне електричне ограде

Виртуелна ограда се може дефинисати као структура која служи као ограда, или граница али без физичке баријере. Овај концепт ограде је посебно занимљив због великог потенцијала да олакша и унапреди узгајање животиња тако што омогућава да се свакодневни „ручни рад“ пастира замени когнитивним радом. Поред тога, виртуелне електричне ограде стварају могућност проширења области за испашу и на оне пашњаке који нису погодни код класичног извођења на испашу. Постоји више различитих приступа у развоју виртуелних електричних ограда, који се могу поделити у три категорије: прва, када треба задржати животиње у дефинисаном подручју или их држати изван дефинисаног подручја користећи уређаје које животиње носе на себи; друга, да

задржи животиње без постављања уређаја на животињу; и трећа, контрола животиња у складу са променом области виртуелне електричне ограде или коришћење виртуелне електричне ограде као уређаја за даљинско прикупљање животиња. Прве две категорије се баве статичком контролом стоке, док би се трећа категорија могла описати као контрола унутар покретних граница [13].

Идеја ограничавања кретања животиња унутар или ван одређене области без физичких ограда се први пут јавила 70-их година прошлог века, када је предложен уређај који би домаћа животиња носила око врата [14]. Основна замисао виртуелне електричне ограде је да се животиња истренира да реагује на одређени стимуланс који добија када се приближава замишљеној оградаци како би променила смер кретања (слика 2.1). Животиња добија стимуланс преко уређаја у виду огрлице који најчешће носи око врата. Истраживања у току развоја огрлице су обухватала аудио стимулансе у виду звукова различите јачине и тоналитета, физичке стимулансе у виду електро шокова или вибрација [15], [16], [17], [18], [19]. Недостатак уређаја који животиња носи у виду огрлице је могућа појава локалне иритације коже, као и могућност да се животиња закачи за неку структуру и сл. што може довести до повреде. Поред тога, потребно је и подешавати огрлицу како животиња расте. У складу са тим развијана су и решења у виду имплантата [20], како би се предупредили негативни ефекти ношења огрлице.

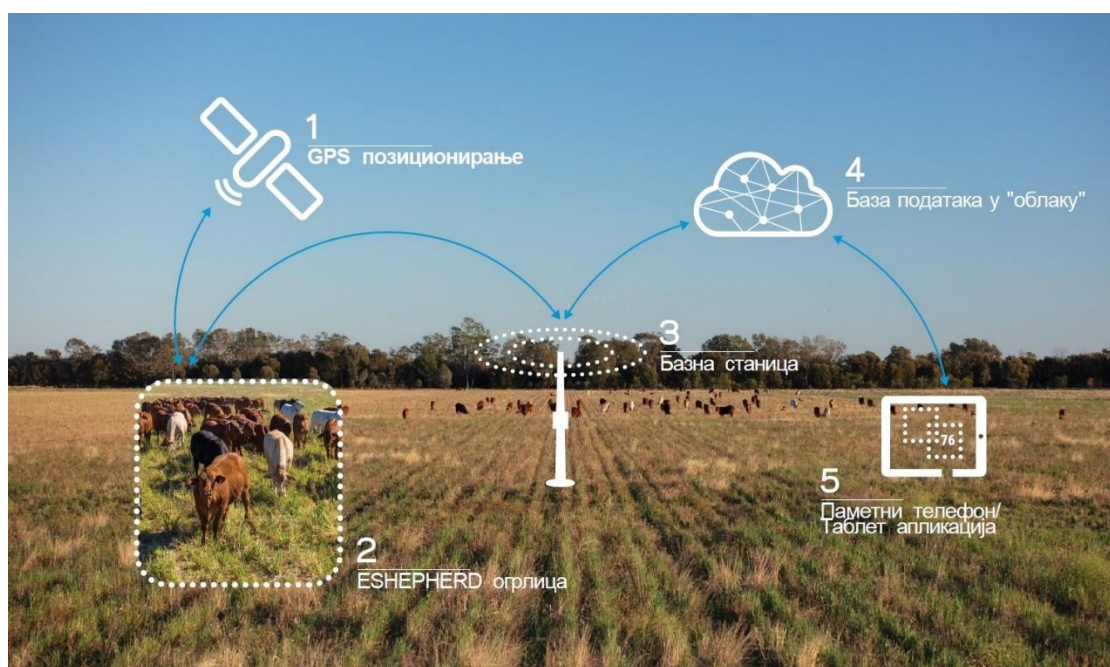


Слика 2.1 Виртуелна електрична ограда [21]

Почетна решења су за одређивање тренутне удаљености животиње у односу на централну тачку користила примљену јачину сигнала током радио преноса од огрлице коју носи животиња [22]. Развој технике омогућио је да се оваква решења, која су била

непоуздана, замене софистициранијим решењима где се користи глобални систем за позиционирање путем сателита GPS (енгл. *Global Positioning System*) [23].

Савремене виртуелне електричне ограде које су тренутно доступне на тржишту су комплексни системи који се састоје из више делова. Са једне стране је животиња која носи уређај у виду огрлице око врата, при чему уређај поседује GPS модул и преко сателита се прецизно одређује позиција животиње на пашњаку. Ова позиција се затим прослеђује базној станици. Базна станица прикупља све позиције животиња и смешта их у базу података. Са друге стране, корисник на свом уређају инсталира одговарајући софтвер. Корисник преко овог софтвера може у реалном времену да прати позицију сваке животиње као и да направи виртуелну ограду, односно дефинише површину коју животиње могу да користе као пашњак. Дефинисана површина се преко интернета шаље базној станици која даље прослеђује информације свакој огрлици (слика 2.2). Животиње које носе ове огрлице су трениране да препознају стимулусе и остану унутар виртуелних граница. Када се животиња приближава виртуелној огради, огрлица емитује одговарајуће тонове како би је упозорила да треба да се врати. Ако животиња игнорише ове звуке, и настави да се креће према огради, огрлица испоручује краткотрајни безопасни електрични удар, како би је натерала да не пређе виртуелну границу. Код неких уређаја између звучног и електричног стимулуса постоји и ниво у виду вибрације. На овај начин животиња учи да препозна звучно упозорење и окреће се како би избегла електрични удар.



Слика 2.2 Систем виртуелне електричне ограде доступан на тржишту [24]

2.2 Покретна ограда за испашу

Покретна ограда за испашу је иновативно решење које се примењује у регенеративној пољопривреди. Основна идеја је да се направи динамичан пољопривредни систем који комбинује сточарску и биљну производњу тако да више врста биљака и стоке могу коегзистирати на пољу истовремено под контролисаним условима [25]. На земљишту се наизменично саде редови усева и редови пашњака. Како би се спречило да животиње уништавају усеве док су на испашу направљена је покретна ограда. Ова покретна ограда је у потпуности аутономни објект који за покретање користи енергију добијену преко соларних панела. Састоји се од штале која је у средини и два ограђена простора испред и иза штале (слика 2.3). Како би ишле на испашу животиње из штале могу да изађу само у ограђени простор. Током дана ова покретна ограда се неколико пута помера по пашњаку користећи GPS за прецизно навођење како би се кретао по задатој путањи. У току сезоне померањем ограде животиње могу да конзумирају разнолику мешавину биљака са пашњака док својим копитима, њушкама и микробиомима стимулишу тло, остављајући за собом мешавину органског ђубрива за храњење земљишта. Следеће сезоне се затвара циклус, тако што се места где су били усеви користе као пашњаци, док се на местима где су били пашњаци саде усеви. На овај начин је омогућено да се искористе природни циклуси биљно-животињског екосистема како би се узгајале здравије животиње, земљиште било плодније, а притом и смањено извор угљеника [25], [26].



Слика 2.3 Покретна ограда [27]

2.3 Примена дрoнова за управљање испашом

Првобитна намена дрoнова је била за војне сврхе, где их је војска користила као покретне мете приликом гађања или као уређаје за надгледање. Међутим, са развојем технологије првобитна намена је превазиђена и последњих година добијају на значају у различитим сферама људског рада. Напредак технологије је омогућио да се раде различите адаптације како би се дрoнови користили у разне сврхе. Велика предност дрoнова као беспилотних летелица је могућност за њихово даљинско управљање или аутономан лет по унапред програмираној путањи [28]. Због свега овога дрoнови у последње време налазе велику примену у пољопривреди. Различите модификације омогућавају примену у сточарству у виду праћења и пребројавања животиња на великим површинама [29], [30], [31], [32], [33], праћења здравља животиња [34], [35] коришћењем различитих термалних сензора, инфрацрвених сензора и оптичких уређаја или усмеравања њиховог кретања [36]. Свакако најтежи задаци који се стављају пред дрoнове су везани за управљање испашом, односно контролом крда.

У истраживањима која се тренутно спроводе, пред дрoнове се стављају задаци које обављају пастирски пси, у виду скупљања животиња, усмеравања њиховог кретања, одвођења на појило и сл. У Аустралији и на Новом Зеланду дрoнови се користе за скупљање животиња [37]. Како би се користили за напредније задатке, опремају се додатним уређајима у виду сирена или звучника. Животиње се тренирају да реагују на одређени звук који чују како би променили правац кретања, док им се преко звучника могу пуштати и познати звуци попут лавежа паса [38]. На слици 2.4 је приказан један дрoн-пастир.



Слика 2.4 Дрон-пастир [39]

2.4 Роботизовани системи за испашу

Различита техничка решења се често користе када је потребно управљати испашом, нпр. ограничити приступ пашњацима само на одређене животиње и у одређено време. За ове потребе се најчешће користе простија решења попут аутоматских капија [40]. Поред оваквих једноставнијих решења, константно се истражује примена комплекснијих система, који би могли делимично или у потпуности да замене рад пастира. Константан развој на пољу роботике је омогућио да роботизовани системи нађу примену у сточарству. Посебна пажња се поклања истраживањима која имају за циљ развој роботизованих система који би могли да извршавају задатке попут одвођења животиња на испашу, контроле испаше, враћања у шталу и сл.

Један од пионира у овој области је холандска фирма „Lely“, која је 2007. године предложила аутоматски систем за контролу испаше под називом „Voyager“ (слика 2.5).

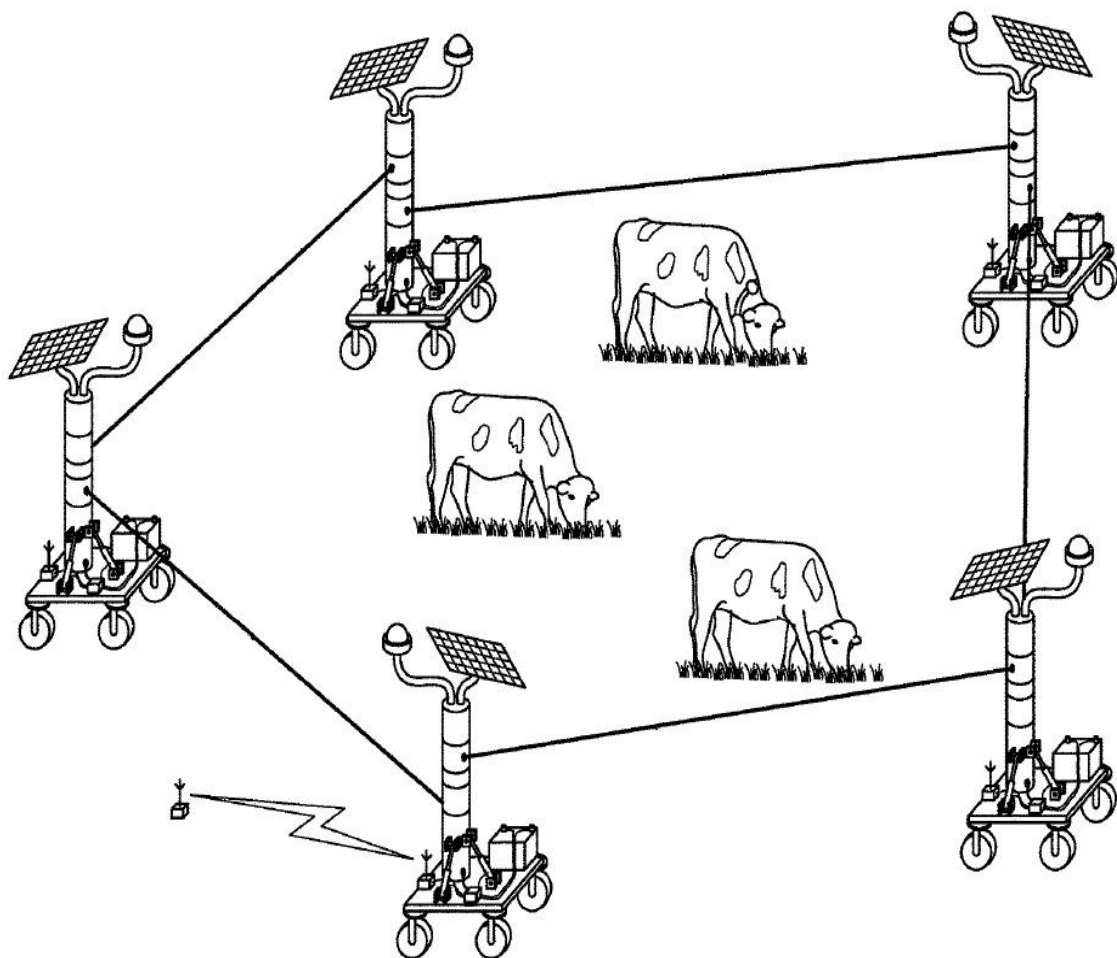


Слика 2.5 „Voyager“ аутоматски систем за контролу испаше [41]

Овај систем се састоји од 2 мобилна робота који су повезани жицом кроз коју се пропушта струја. Ови роботи се крећу дуж статичних ограда које су постављене са њихових бочних страна, док се на четвртој страни оgrade налази штала. Контрола пашњака се врши на тај начин што се роботи померају и омогућавају животињама да изађу из штале, а након тога и приступе одређеној површине пашњака. Када је потребно

животиње вратити у шталу, роботи мењају смер кретања, крећу се ка штали приморавајући животиње да се врате. Предложени систем је сличан старијем решењу [42] код кога се уместо робота покретни део оgrade састоји од низа тачкова на једној осовини који су међусобно повезани жицом, при чему су крајеви осовине повезани са уређајем на непокретним паралелним деловима оgrade, помоћу опруга.

Истраживачи у [43] предлажу роботизовани систем који обухвата независну електричну ограду која је аутоматски покретна без мануелних интервенција (слика 2.6). Кретањем робота по пашњаку управља се кретањем оgrade и истовремено омогућава њено скупљање и ширење како би се обухватила одговарајућа површина пашњака при испаши. Предложени роботизовани систем би могао да се креће само по пашњаку на коме је постављен и могао би да се користи само за чување стоке. Из доступних података није јасно како би систем затварао струјно коло, односно да ли би електрична ограда радила.



Слика 2.6 Идејно решење роботизоване електричне оgrade [43]

3. Физички повезани роботи

Група од два или више аутономна мобилна робота који раде удружени се могу посматрати као тим мобилних робота. Код оваквих система више робота - MRS (*енгл. Multi-robot Systems*) појединачни роботи могу да комуницирају са другим роботима из тима и да се удруже са њима како би се постигао одређени циљ. У оваквим системима, роботи су мање способни да нешто ураде као јединка, већ права снага лежи у тиму робота, односно у њиховој кооперацији [44]. Тим робота може обезбедити редундантност и кроз међусобну сарадњу допринети решавању додељеног задатка, или може извршити додељени задатак на поузданији, бржи или јефтинији начин у односу на то када би тај задатак био извршаван појединачним роботима. MRS има широку примену у различитим доменама попут прецизне пољопривреде, флексибилне производње, праћења животне средине, операцијама трагања и спасавања, истраживању свемира и подводним истраживањима, а налази примену чак и у индустрији играчака, попут роја роботских играчака [45].

Ова област роботике води порекло из осамдесетих година, када су истраживачи почели да истражују проблеме у мобилним системима више робота. У односу на скромне почетке, када су истраживања обухватала архитектуру или планирање путање система више робота, данас се ова област проширила на велики спектар тема које обрађује. Главне теме којима се ова област бави су [46]:

- Биолошки инспирисани MRS;
- Комуникација;
- Архитектура, расподела задатака и управљање;
- Локализација, мапирање и истраживање;
- Манипулација и транспорт објеката;
- Координација кретања;
- Роботи који се могу реконфигурисати.

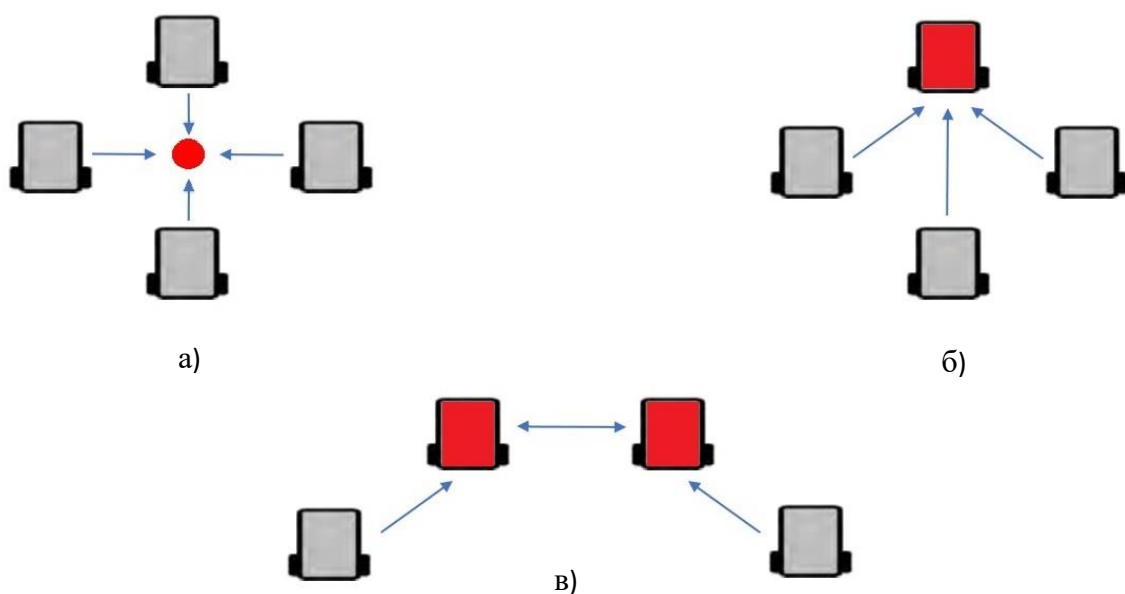
У оквиру ових тема, управљање формацијом и координација добијају велику пажњу јер група робота може ефикасније да изврши мисију одржавањем унапред дефинисаног облика формације. Управљање формацијом је инспирисано само-организацијом која се јавља у природи, попут јата птица или риба, или инсеката. У литератури је управљање формацијом опширно проучавана тема, где је посебна пажња усмерена на системе беспосадних копнених возила – UGV (*енгл. Unmanned Ground*

Vehicle), беспилотних летелица – UAV (енгл. *Unmanned Aerial Vehicle*) и аутономних подводних возила – AUV (енгл. *Autonomous Underwater Vehicle*).

Кооперативни систем са више робота се састоји од робота који могу да раде заједно да би извршили глобални задатак. У том смислу, управљање тимом се назива кооперативно управљање, које наглашава функцију сарадње робота током рада. Управљање формацијом више робота се може сматрати посебном кооперативном операцијом. Циљ формације је одржавање одређеног облика формације са одговарајућим растојањима између робота током извршавања задатка. Као резултат тога, облик и положај су два важна фактора конфигурације формације. Формација и координација се могу дефинисати на следећи начин:

- Формација је мрежа међусобно повезаних робота, при чему сваки робот мора да одржава релацију у односу на суседне роботе.
- Координација је сарадња у којој за акције које извршава сваки робот мора да узме у обзир и акције које извршавају други роботи. Роботи морају да комуницирају, размењују информације и на неки начин узајамно делују како би извршили задатак [47].

Тим робота може заузети различите облике у формацији, при чему су најчешћи облици линија, троугао, дијамант, итд. Сваки робот у тиму мора имати специфичан положај у формацији. Постоје три главне технике за заузимање положаја у формацији [48] – а) у односу на централну тачку, б) у односу на положај лидера тима и в) у односу на положај унапред одређеног суседног робота, као што је приказано на слици 3.1.



Слика 3.1 Позиција у формацији одређена различитим референтним техникама

Системи више робота код којих је потребно управљати формацијом, уопштено узевши, могу се поделити у две групе – група код које више робота ради у тиму како би испунили неки задатак, али између робота не постоји физичка веза, нпр. роботи који играју фудбал и заједно треба да постигну гол [49] и групу код које се успоставља одређена физичка веза између робота, нпр. роботи који се комбинују како би савладали неку препреку док један робот сам не би могао да изврши задати задатак [50].

Са аспекта овог доктората, посебно је важна група где је успостављена физичка веза између робота, пошто исправно управљање физичком везом треба да омогући формацијско управљање целим тимом робота. Када су роботи физички повезани, проблем координације представља додатни изазов. Поред саме координације кретања и извршавања задатака подсистем физичке повезаности робота мора у реалном времену да одговори на захтев оптималног одржавања физичке везе. У стручној и научној литератури која се бави проблематиком физички повезаних робота истраживања су углавном базирана на испитивањима лабораторијских прототипова или симулацијама система. Веза која се успоставља између робота може бити крута или еластична физичка веза.

3.1 Физички повезани роботи са крутом везом

Успостављање круте физичке везе између робота како би се извршили комплексни задаци је доминантан тип истраживања којима се бави научна заједница. У раду [51] аутори су приказали само-састављање робота у већи склоп како би могао да се изврши задатак преласка брда. Конфигурацију брда роботи не знају унапред – брдо може да постоји или да не постоји, и може варирати по стрмини. У неким конфигурацијама, роботи могу да пређу брдо брже ако се крећу појединачно, док друге конфигурације захтевају да се роботи само-саставе како би савладали брдо. Такође, демонстрирана је применљивост развијене стратегије само-састављања и на решавање задатака преласка рупе. Аутори у [52] се баве проблемом у ком симулирају координисано кретање тима од 4 робота који су међусобно повезани. Овако повезани роботи треба да изврше задатак где је потребно да се крећу што је могуће брже, а да притом структура коју формирају буде колинеарна. Аутори у [53] су истраживали како група физички повезаних робота може да ради у тиму користећи прости неуронски контролер који има приступ само локалним информацијама са сензора. Тим робота се креће као целина и по потреби може да промени свој облик када је то потребно, нпр. да прођу кроз узак пролаз или да

савладају неку препреку. Кретање робота је, користећи неуронски контролер, прво симулирано у виртуелном окружењу, а након тога су урађени тестови са реалним роботима. У раду [54] аутори су се бавили планирањем путање и управљањем физички повезаних робота како би се спречили судари са препрекама. Предложена су два нова приступа за избегавање колизије – реактивни приступ у коме се користи децентрализована метода са употребом сензора на роботима и кооперативни приступ који је централизован и користи информације из окружења, нпр. локације препрека како би се спречили судари. Резултати су показали да је реактивни приступ ефикаснији са становишта времена потребног за рачунање и потрошње енергије, док је кооперативни приступ бољи за избегавање препрека у скученим просторима. У раду [55] је урађена симулација како би се испитало пројектовано управљање робота са погоном на два точка када дође до отказивања погона. Како би се успоставила редундантност погона успостављена је физичка веза између два оваква робота. Кинематика и динамика повезаних робота је измоделирана у виртуелном окружењу а након тога је урађена симулација. Резултати симулације су потврдили ефикасност предложене управљачке шеме за овако повезане роботе када се деси квар на неком од погонских точка. У раду [56] је предложено управљање групом робота, где су 3 робота са погоном на два точка повезана физичком везом при чему постоји квар на неком од погона. Како би се пратила задата путања, на основу захтева за брзину је дизајниран кинематички контролер, док је динамички контролер дизајниран како би се обезбедила стабилност. Перформансе предложеног управљања су приказане кроз резултате добијене симулацијом током кретања робота.

3.2 Физички повезани роботи са еластичном везом

Истраживањима која обухватају успостављање еластичне физичке везе између робота се бави веома мали број аутора. У раду [57] је урађено истраживање у коме је тим робота преносио објекат попут црева или жице. Цео систем је прво моделиран у виртуелном окружењу које је даље послужило за симулације кретања робота како би се проценило управљање. Испитиване су две стратегије управљања, користећи глобални контролер и локални фази контролер. На крају су изведени физички експерименти са тимом робота који преносе жицу.

На основу прегледа научне и стручне литературе, може се закључити да су тренутна истраживања базирана на успостављању круте физичке везе између робота од

којих се састоји тим, при чему силе које се јављају током тимског рада робота не доводе до деформације физичке везе. Како је аутору овог доктората познато, успостављање променљиве физичке везе између робота до сада није обрађивана тема у истраживањима.

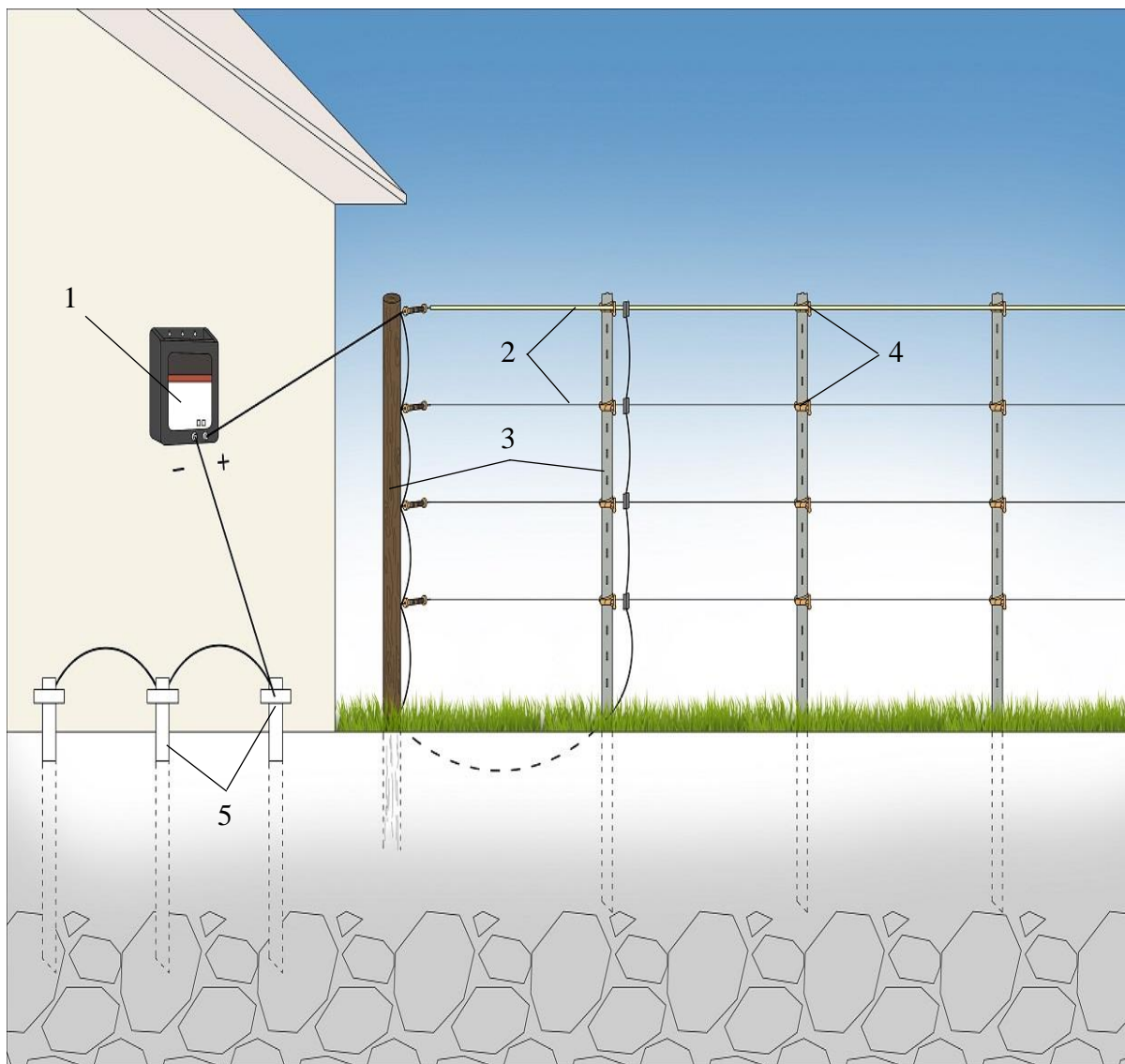
У овом докторату део истраживања ће бити везан за успостављање еластичне физичке везе. Силе које се јављају током затезања могу довести до истезања ужади којима је успостављена физичка веза. Такође, услед чињенице да интегрисани систем физички повезаних робота над којим је успостављена физичка веза може да формира различите конфигурације, долазиће до промене растојања између роботских јединица, односно до скраћивања или продужавања саме физичке везе. Стога је контрола силе у ужади и управљање њиховим затезањем и отпуштањем важан део за правилно функционисање система RoboShepherd.

4. Примена концепта електричне оградe

Ограда се може дефинисати као структура која служи као ограђени простор или баријера која треба да спречи кретање преко одређене границе. У зависности од терена, локације и животиња које се ограђују, ограде се могу направити од различитих врста материјала. Обично су направљене од дрвених стубова који су побијени у земљу и међусобно повезани помоћу дрвених дасака или греда, металних жица и сл. Појава оградe је везана за припитомљавање животиња, односно како се припитомљавање животиња развијало, одређене области које су биле предвиђене за садњу усева су се ограђивале дрветом или каменом како би се животиње држале ван тих подручја [58].

Електрична ограда је баријера која користи електричне шокове да одврати животиње од преласка одређене границе. Први пут се појављују у Сједињеним Америчким Државама тридесетих година двадесетог века као средство за контролу дивљих животиња [59]. У данашње време најчешћа примена електричних оградa је у сточарству где је потребно оградити неку површину која се користи за испашу животиња. На овај начин се врши контрола кретања домаћих животиња које су унутар електричне оградe док се истовремено предаторима онемогућава приступ од споља и на тај начин штити крдо. Поред тога електричне ограде се користе и када је потребно заштитити обрадиво земљиште или баште од дивљих животиња. Због своје јефтине и једноставније градње електричне ограде преузимају примат над класичним оградама. Електричне ограде су дизајниране да створе електрични шок када их животиња додирне. Електрична струја се шаље дуж жице у одређеним временским интервалима и када животиња додирне жицу која је под напоном, електрични круг се затвара стварајући краткотрајни електрични шок. Иако су примарно дизајниране да створе безбедан струјни удар који треба да доведе до померања животиње од оградe, напон електричног шока може имати ефекте у распону од нелагодности до смрти [60].

Електричне ограде се састоје из више основних делова у виду уређаја који даје струју у импулсима, електричних проводника, стубова, шипки за земљу и изолатора (слика 4.1). Поред основних могу да садрже и додатне елементе у виду прекидача, затезача, котурова и др.



Слика 4.1 Електрична ограда – 1 – уређај за давање импулсне струје, 2 – електрични проводник, 3 – стуб, 4 – изолатор, 5 – шипка за земљу

4.1 Типови електричних ограда

Електрична ограда има широку примену у пољопривреди када је потребно држати животиње у траженом подручју као и за њихову заштиту од предатора. До сада су на тржишту доступни различити готови производи док постоји и одређени број иновационих решења у развоју у виду:

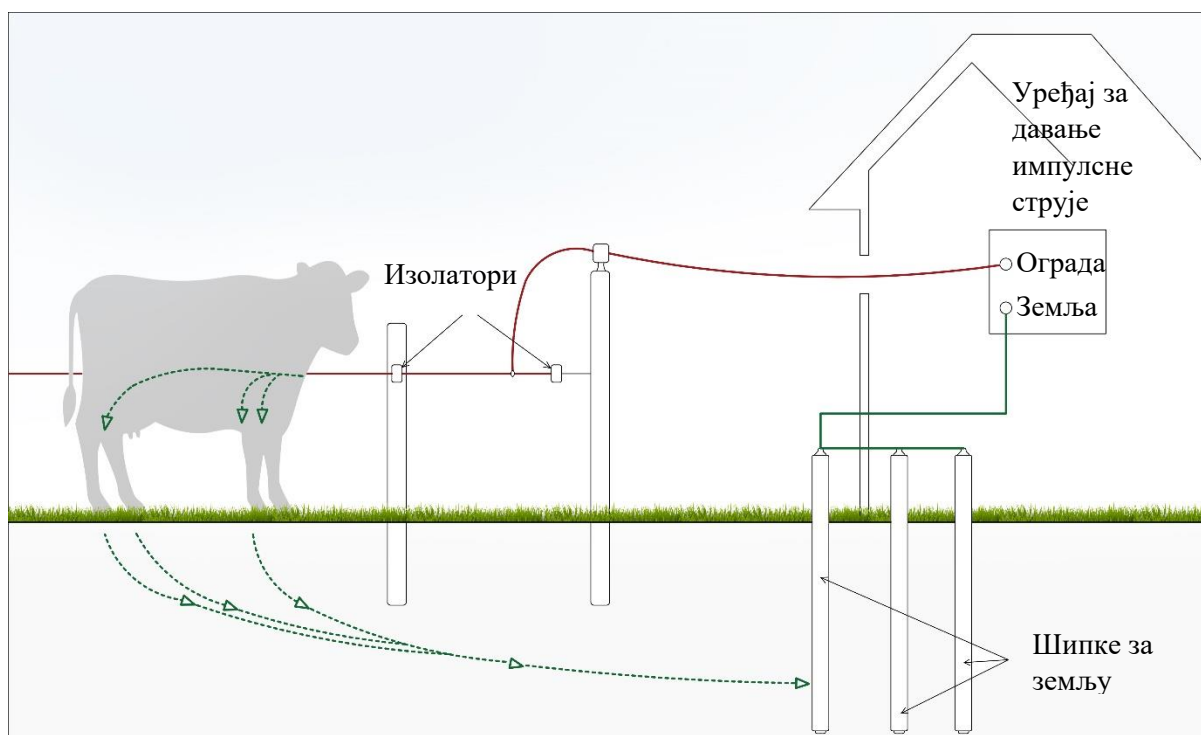
- Сталних електричних ограда;
- Преносних електричних ограда.

4.1.1 Сталне електричне ограде

Сталне електричне ограде су најкоришћенији тип електричних ограда у пољопривреди. Одликују се једноставном инсталацијом и пуштањем у рад. У зависности од тога како животиња у додиру са електричним проводником затвара струјно коло постоје 3 типа ових ограда:

- Струјно коло се затвара преко земље [61];
- Струјно коло се затвара преко ограде [62];
- Биполарни систем [63].

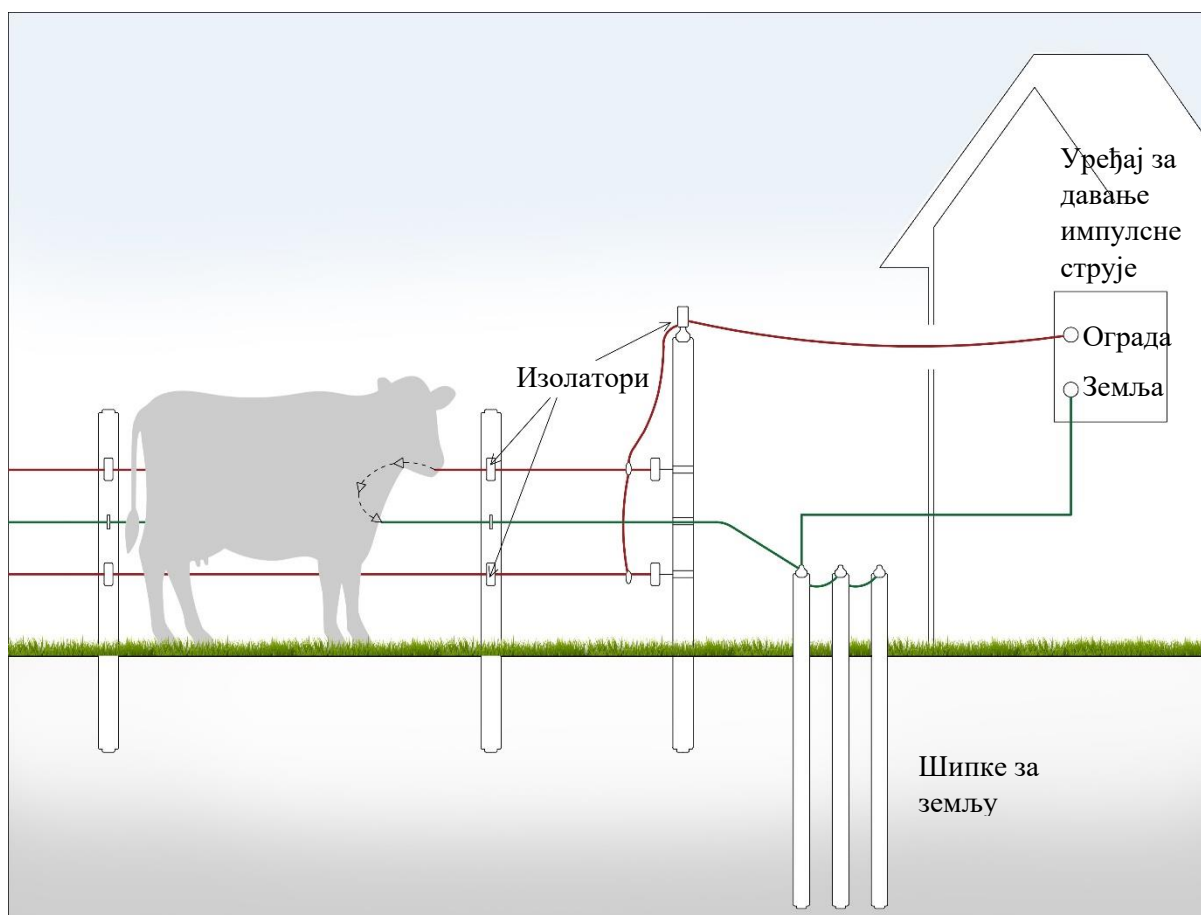
Код електричне ограде код које се струјно коло затвара преко земље један крај уређаја који даје струју у импулсима се везује за једну или више жица које су закачене на вертикалне стубове који су изолатори, док се други крај везује за металне шипке које се побијају у земљу (слика 4.2). Када животиња додирне жицу која је под напоном преко земље се затвара струјно коло до уређаја који даје импулсну струју и она добија краткотрајни електрични удар. Мана овог система је да ако је земља јако сува или је животиња далеко од металних шипки може се десити да се струјно коло не затвори при чему може доћи до пробијања ограде од стране животиња.



Слика 4.2 Електрична ограда код које се струјно коло затвара преко земље

Код електричне ограде код које се струјно коло затвара преко ограде монтирају се додатне жице, између жица које су под напоном, и везују се за металне шипке које су

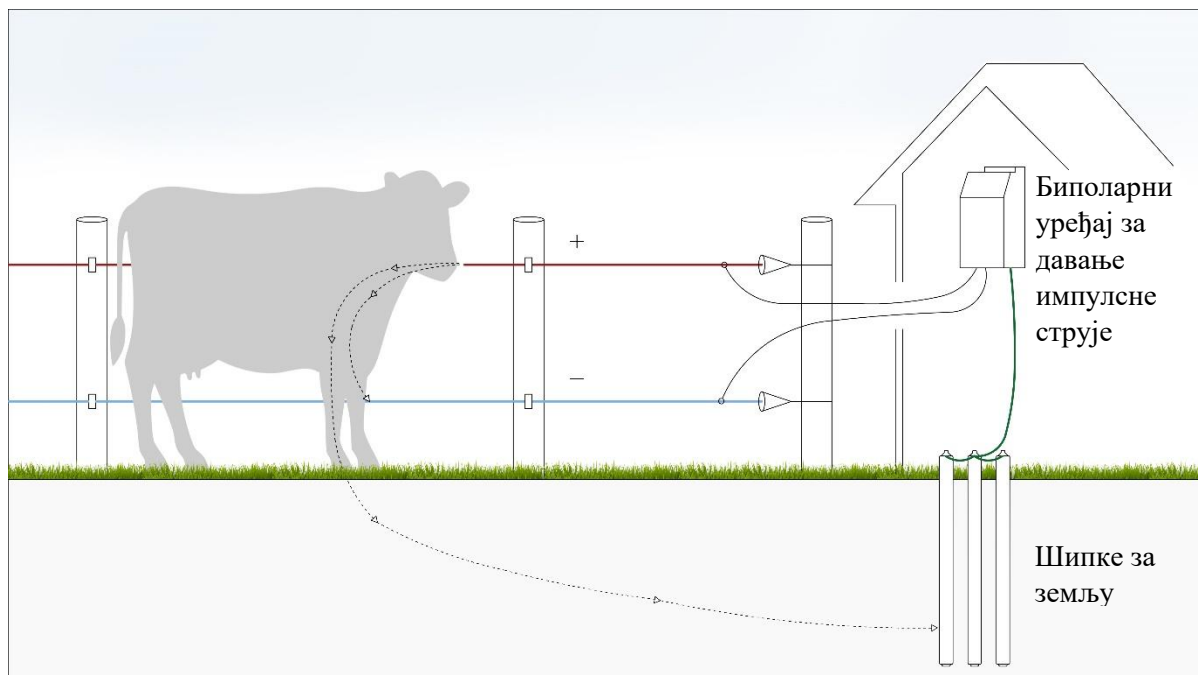
побијене у земљу (слика 4.3). Код овог система струјно коло може да се затвори на два начина. Ако је земља довољно влажна потребно је да животиња додирне жицу која је под напоном и тада ће се струјно коло затворити преко земље као код првог система. У случају да то не ради, друга могућност је да животиња додирне две суседне жице, односно жицу под напоном и жицу које је уземљена и на тај начин ће доћи до затварања струјног кола.



Слика 4.3 Електрична ограда код које се струјно коло затвара преко оgrade

Биполарна електрична ограда је ограда са додатном жицом под напоном, односно код уређаја који даје импулсну струју постоје два сета жица под напоном, позитивни и негативни, као и трећи извод за земљу (слика 4.4). Овај тип оgrade се користи у пределима где је велика вероватноћа да дуго времена неће бити падавина, односно појаве изузетно суве земље. Струјно коло се код овог типа електричне оgrade може затворити на два начина. Први начин је додиривањем жица под напоном (позитивне и негативне) док је друга могућност за затварање струјног кола, ако је довољна влажност земљишта, додиривање само једне од жица која је под напоном и тада ће се струјно коло

затворити преко земље као код првог система, при чему животиња добија краткотрајни електрични шок.



Слика 4.4 Биполарни тип електричне ограде

4.1.2 Преносне електричне ограде

Преносна електрична ограда је тип привремене ограде која је погодна за лако премештање. Овај тип ограде се користи за контролу пашњака, раздвајање животиња, а може се користити и за заштиту људи од дивљих животиња током камповања. Основна замисао приликом употребе ових ограда је да се одговарајуће пољопривредно земљиште, односно тло са вегетацијом погодном за исхрану планиране врсте животиња, на брз и једноставан начин огради како би могло да се крене са његовом експлоатацијом. У складу са динамиком експлоатације зелене масе, односно када животиње искористе доступне биљке, ограда се расклапа, преноси и монтира на нову површину која ће бити нови пашњак, док се на претходном вегетација не регенерише. На овај начин се омогућава заштита пашњака од прекомерне употребе као и квалитетнија исхрана животиња.

Преносна ограда се најчешће састоји од стубова који се побијају у земљу, а између којих се развлачи жица кроз коју се пропушта импулсна струја, уређаја који даје импулсну струју и батерије (слика 4.5). Главни проблем са овим оградама је обезбеђивање напајања за саму ограду као и тежина делова од којих се ограда склапа. У зависности од површине која се ограђује, стубови и потребна жица од које се прави

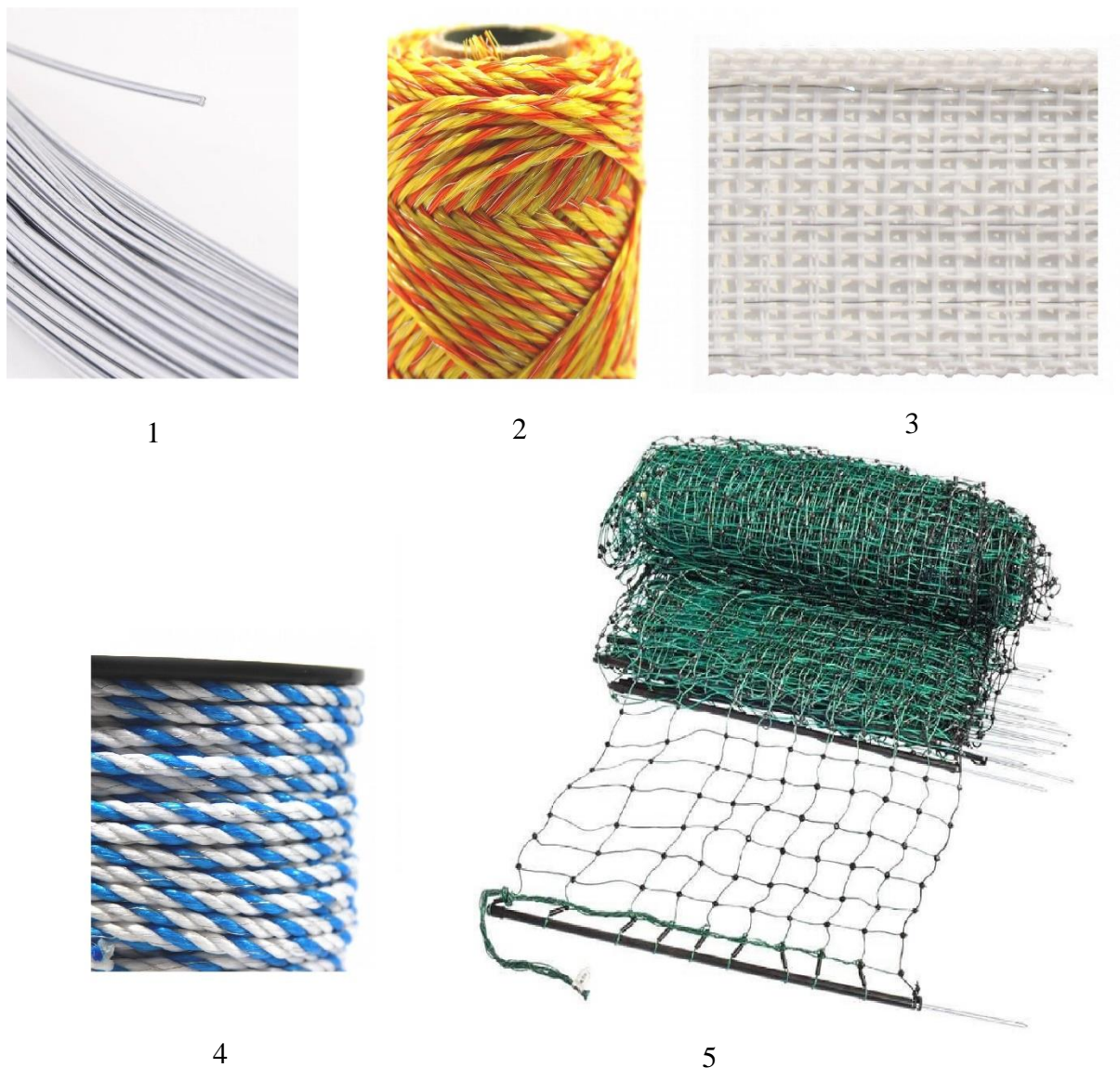
ограда су тежили више килограма, док су уређај који даје импулсну струју и батерије тежили и преко 30 кг [64]. Међутим, са развојем технике дошло је до пробоја на пољу складиштења и генерисања енергије што је омогућило вишеструко олакшање саставних делова ових ограда. Данас, ове ограде се могу поставити, скинути и померити у року од неколико минута. Како би се сачувала њихова преносива природа, мале соларне или батеријске јединице се користе за пуњење и напајање уређаја који даје импулсну струју. Ове јединице су отпорне на временске услове и величине су акценташне [65]. Због своје економичности, једноставности приликом употребе и преносивости, у данашње време су све прихватљивије за употребу.



Слика 4.5 Преносна електрична ограда [66]

4.2 Електрични проводник

У електричној огради, као електрични проводници се користе жице, уплетене жице, траке, уплетена ужад и мреже (слика 4.6) [67].



Слика 4.6 Електрични проводници – 1 – жица, 2 – уплетена жица, 3 – трака, 4 – уплетено уже, 5 – мрежа

Жица као електрични проводник је идеална за трајну електричну ограду, посебно за веома дугачке ограде. Лако се одржавају при чему имају дуг век трајања. Најчешће коришћени материјал за електричне ограде је челик, у распону од танке жице која се користи као један електрични проводник до дебље жице високе затезне чврстоће.

Уплетена жица је група тањих пластичних и металних жица које чине проводник. Лагана је што олакшава руковање, инсталацију и намотавање када се користи као

преносива ограда. Мање је издржљива од челичне жице, али се лако затеже и може се брзо и лако поставити.

Трака се састоји од танке жице која је провучена кроз пластичну траку. Пружа већу видљивост од жице. Због своје флексибилности погоднија је за животиње које се брзо крећу, јер у случају изненадног ударања или улетања животиње у ограду неће доћи до повређивања животиње.

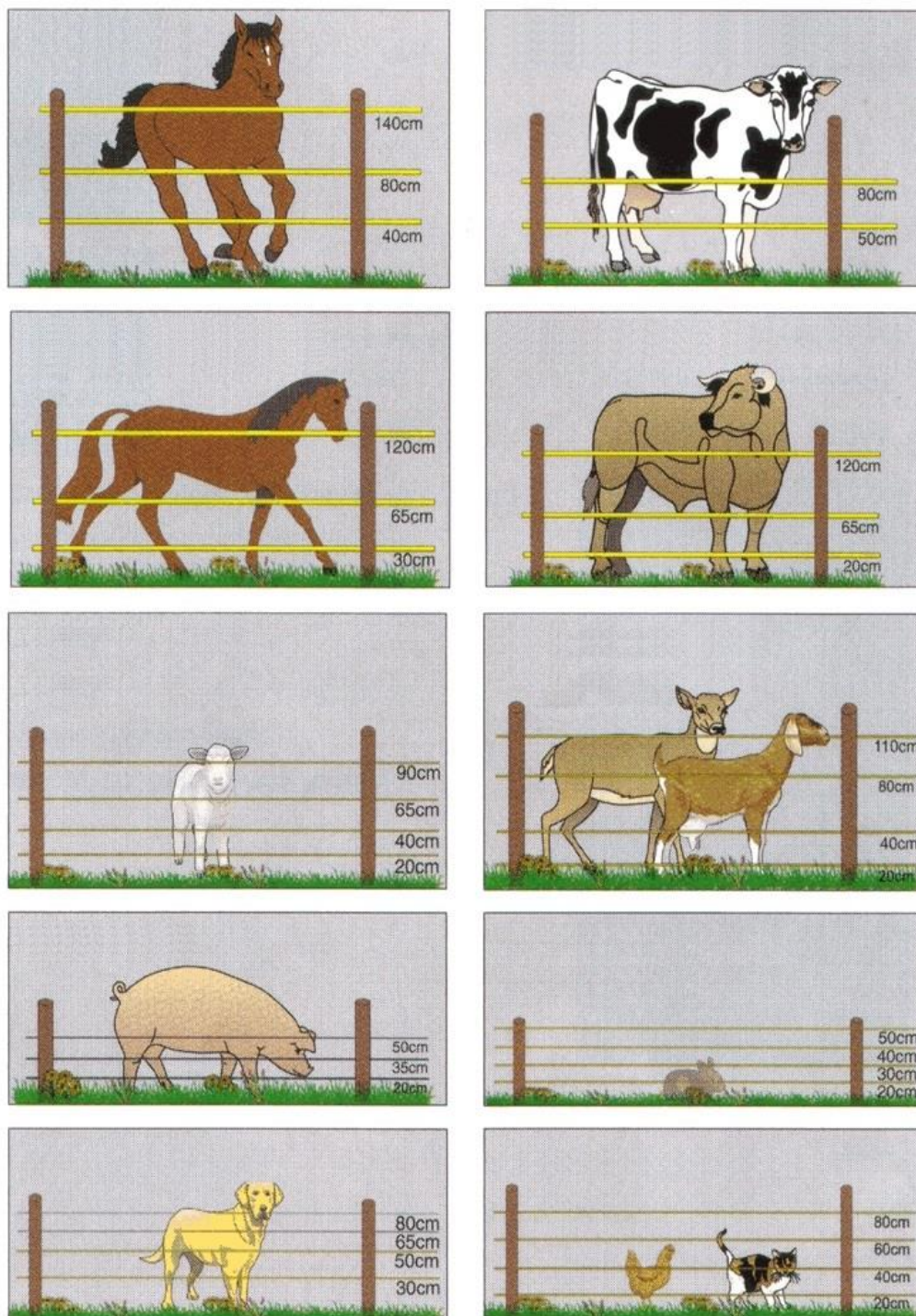
Уплетена ужад су направљена од полипропилена и дебљих металних жица које чине проводник. Одликују се већом чврстоћом од уплетених жица и трака, али и већом тежином. Због своје флексибилности погодне су за мобилне ограде пошто се лако могу намотавати и одмотавати.

Мреже су погодне као електрична ограда за домаће животиње или као заштита обрадивог земљишта од дивљачи. Израђене су од издржљиве пластике и металног проводника. Једноставне су за монтажу пошто се купују са одређеном висином и стубовима за постављање.

Приликом избора електричног проводника, висине и густине ограде као и електричног напона који је потребан за одвраћање, одлучујући фактор је врста животиње која се ограђује (слика 4.7). Истраживања која су рађена на тему висине електричне ограде показују да животиње долазе у контакт са електричном оградом испод висине рамена одрасле јединке неке врсте, при чему као груби критеријум где се додирује ограда може да се узме половина висине рамена. Поред тога, установљено је да је висина на којој је свака животињска врста прошла кроз ограду била испод висине рамена. У складу са тим, како би се повећала ефективност електричних ограда, препорука је да најнижи електрични проводник буде на висини мањој од половине висине рамена одрасле јединке животињске врсте коју ограђује [68]. Такође, раздаљина између стубова за које се качи електрични проводник не треба да буде мала, може да иде и до 30 метара, при чему електрични проводници треба да буду довољно затегнути да се међусобно не додирују, али не превише јер то може да изазове пуцање самих проводника или повлачење стубова. Изолатори који су закачени за стубове и који носе електричне проводнике треба да буду квалитетни, механички издржљиви и отпорни на старење како би се обезбедила безбедна и дуготрајна употреба електричне ограде [69], [70].

Установљено је да домаће животиње веома брзо уче, некад након само неколико струјних шокова, да додир са електричном оградом није пријатан и да је најбоље избегавати је. Након тога, домаће животиње ће избегавати ограду, док ће се унутар ограђеног простора кретати без устручавања. Насупрот тога, дивље животиње које нису

имале интеракције са електричним оградама могу тестирати структурни интегритет ограде једноставним покушајем да прођу право кроз њу [71]. У таквим случајевима се користи више затегнутијих жица под већим електричним напоном, и до 10000 V [72], како би се спречио пробој или оштећење ограде.



Слика 4.7 Препоручена висина и густина електричне ограде према врсти животиње

[73]

4.3 Напајање електричне ограде

Напајање електричне ограде се врши помоћу уређаја који генерише импулсну струју (слика 4.8) и може се сматрати да је он „срце“ целог система. Прве генерације уређаја који даје импулсну струју које су се појавиле 1930-их година прошлог века су за напајање електричне ограде генерисале континуалну струју високог напона и ниске јачине. Овај првобитни дизајн је користио трансформатор високе импедансе како би подигао улазни напон и генерисао континуалну струју ограничене јачине и напона од неколико киловолти. Пошто електричне ограде струјно коло најчешће затварају преко земље, дешавало се да приликом употребе ових уређаја у условима повећане влажности земљишта, нпр. након обилнијих киша, дође до „дурења“ струје, односно напон ограде је падао до тачке где је био превише низак да у додиру животиње са оградом оствари електрични шок. Поред тога, додиривање ограде са вегетацијом, услед константног напајања ограде је повремено доводило до пожара. Како би се избегли ови проблеми, развијен је уређаја који даје импулсну струју који може ефикасно да ради под различитим условима. Овај нови тип уређаја генерише импулсну струју високог напона. Пошто је трајање излазног импулса било веома кратко, то је омогућило да се импулсна струја веће јачине може пуштати кроз ограду уз одржавање ефективне вредности јачине струје у оквиру дозвољених граница са становишта безбедности [74].

У данашње време већина доступних уређаја који дају импулсну струју ради тако што струју са улаза претвара у импулсну струју високог напона на излазу. Најчешће је напон на изласку у опсегу од 2000 - 6000 V, а по потреби може ићи до 10000 V. Импулсна струја се пушта на сваких 1-2 секунде, а у зависности од произвођача импулс може да траје и само 0.0001 секунду. Међународна електротехничка комисија ИЕС (*енгл. International Electrotechnical Commission*) је у свом стандарду везаном за уређаје који дају импулсну струју који напајају електричну ограду направила поделу према максималној дозвољеној енергији, односно јачини излазне струје из уређаја. Према тој подели прописано је да због безбедности људи и животиња, уређаји који ограничавају енергију смеју на излазу да дају максимално 5 J, док код уређаја који ограничавају јачину електричне струје, струја на излазу зависи од дужине трајања импулса, при чему је максимална дозвољена јачина струје 15,7 А, за импулсе који трају 0.1 ms и краће [75].

У зависности од доступности извора напајања, дужине ограде која треба да се електрификује и врсте животиње која се чува могуће је поставити уређаје који дају импулсну струју различитих јачина и врсти напајања. Улазна струја која се користи за

напајање уређаја који дају импулсну струју може бити наизменична или једносмерна. На удаљеним локацијама где класично напајање није могуће користити, користе се соларни уређаји који дају импулсну струју. Ови уређаји се састоје од соларних панела и батерије како би обезбедили одговарајуће напајање ограде при чему се батерија може користити и за складиштење струје [76].



Слика 4.8 Биполарни уређај који даје импулсну струју [77]

4.4 Стубови, шипке за земљу и изолатори

Стубови се користе као носећа структура за електрични проводник. Код сталних електричних ограда се углавном користе дрвени стубови, док се код преносних електричних ограда углавном користе метални или пластични стубови.

Електрични проводник се за стубове качи преко изолатора. Поред тога што носи електрични проводник, намена изолатора је и да спречи пренос струје на стуб у случају да и он има проводна својства. Изолатори се по облику разликују у зависности од тога да ли се електрични проводник качи за први/задњи стуб или за стуб у средини електричне ограде (слика 4.9).

Шипке за земљу служе за повезивање уређаја који дају импулсну струју са земљом како би се омогућило затварање струјног кола кад животиња додирне ограду. У

складу са наменом увек се израђују од материјала који је електро проводан. У зависности од влажности земљишта, јачине уређаја који дају импулсну струју као и дужине ограде, шипке је потребно забити у земљу у дубини од 30 см до 2 м [78].



Слика 4.9 Изолатори: 1 – угаони/крајњи изолатор, 2 – линијски изолатор [79]

5. RoboShepherd – интегрисани систем физички повезаних робота

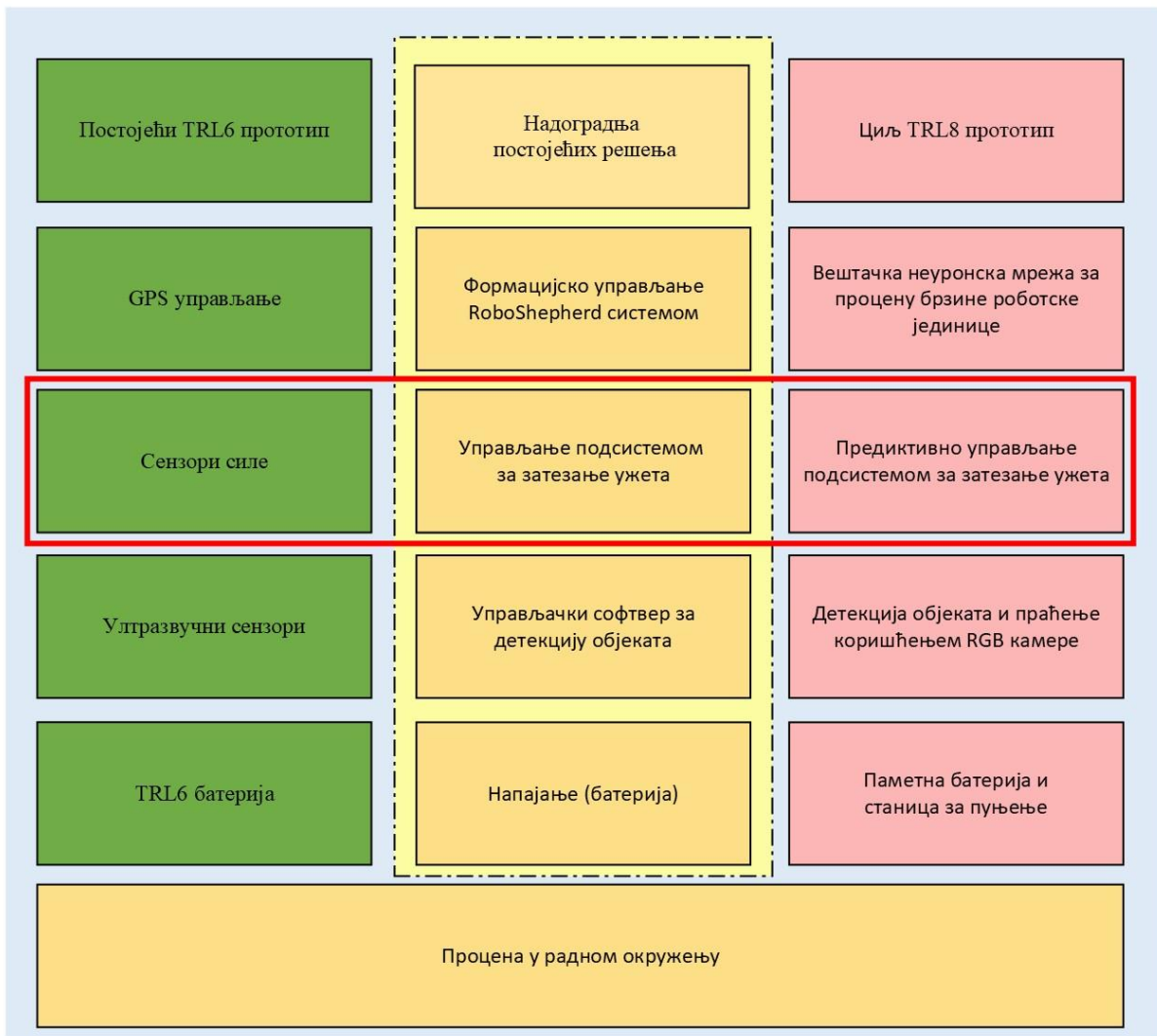
Пошто је одржива производња хране постала глобални проблем, широм света се спроводе истраживања о иновацијама у пољопривредној индустрији. Процена је да се око 77% [80] светског пољопривредног земљишта користи за сточарство, а у недостатку људи који би радили као пастири на овако великом пространству, сточарство се све више окреће роботизованим системима како би се надоместио овај недостатак. Иновативна решења имају за циљ да применом робота и роботизованих система помогну развоју сточарства кроз разне облике у виду роботизованих музилица, замене пастире и на сличне начине. Такође, примена робота у пољопривредно-прехранбеном сектору је један од стратешких приоритета у свим дугорочним документима озбиљнијих држава.

Истраживања која су предмет ове дисертације део су реализације истраживачко-иновационог пројекта „RoboShepherd - аутоматизовани систем за чување и гајење крда“ (IF ID 50123) из Програма сарадње науке и привреде који су финансирани Фонд за иновациону делатност Републике Србије и COMING – Computer Engineering d.o.o, Београд. Овај пројекат су заједнички реализовали развојни тимови компаније COMING – Computer Engineering d.o.o, Београд и Машинског факултета у Нишу. Аутор ове дисертације је као члан развојног тима Машинског факултета у Нишу био одговоран за развој, конструисање и управљање подсистемом везе код физички повезаних робота. Ова докторска дисертација представља резултат рада аутора на пројекту.

Поред експерименталних испитивања у лабораторијским условима, аутор дисертације је користио и експерименталне резултате добијене током вишемесечног тестирања интегрисаног система физички повезаних робота у симулираном и реалном окружењу који су били саставни део реализације целог пројекта.

У научном смислу, ова докторска дисертација представља један од научних доприноса и резултата реализације целог истраживачко - иновационог пројекта „RoboShepherd - аутоматизовани систем за чување и гајење крда“ (IF ID 50123).

На слици 5.1 су приказане фазе развоја система RoboShepherd са назначеним делом везаним за предиктивно управљање подсистемом за затезање ужета, који је обрађиван у овом докторату.



Слика 5.1 Фазе развоја система RoboShepherd

5.1 Идејно решење

RoboShepherd је роботизован систем који истовремено пружа предности животињама, пашњацима и пастирима и помаже да се различити проблеми реше на иновативан начин. Примарни циљ овог система је смањење трошкова везаних за људске ресурсе, подизање квалитета сточарских производа и очување квалитета пашњака, што резултира ефикасним, исплативим и одрживим узгојним процесом како би се омогућило пољопривредницима да повећају број животиња које узгајају. Крајњи циљ је ефикаснија производња хране која доноси корист целој заједници.

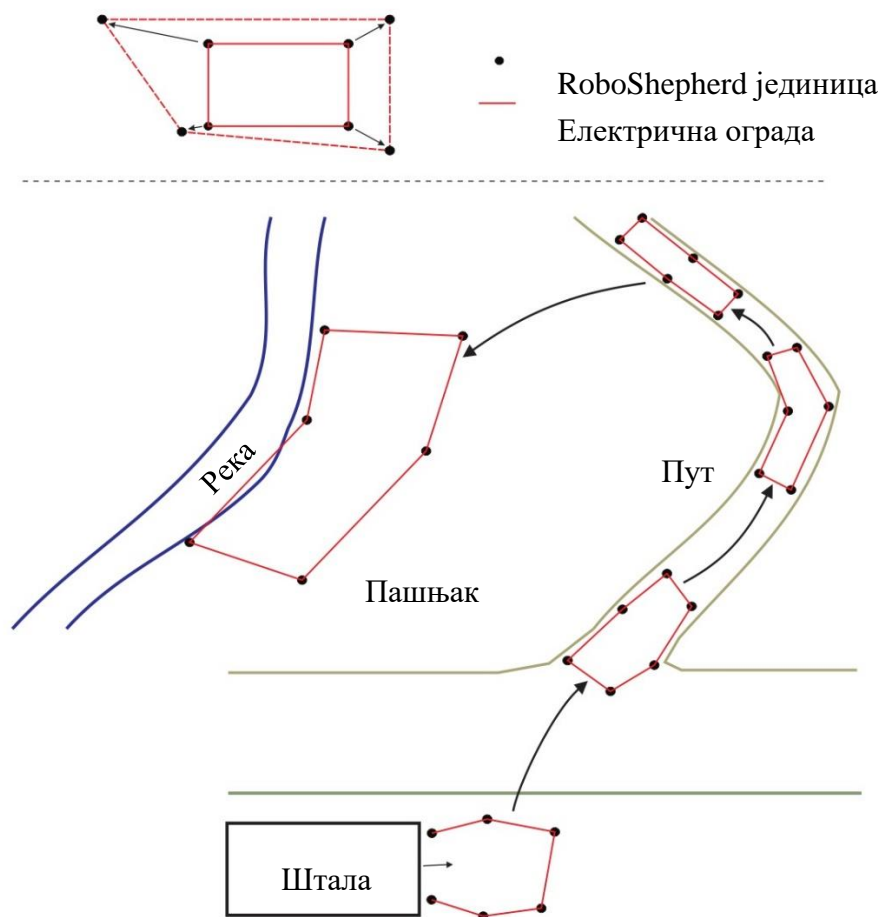
RoboShepherd је рој роботски систем који има функцију покретне полигоналне електричне оgrade која окружује сточне животиње у пољу или их приморава да се крећу дуж унапред дефинисане путање. Систем се састоји од најмање четири роботске

јединице, односно четири покретна стуба који формирају ограду, а који су међусобно повезани ужадима кроз које се шаље импулсна електрична струја. Када животиња додирне два ужета које чине позитиван и негативан крај струјног кола, долази до затварања струјног кола и животиња добија кратак и безбедан струјни удар који је тера да се помери од ограде. Овај принцип се користи и за заштиту животиња унутар система од могућих предатора изван ограде. Поред тога, систем је модуларног типа, тако да додавање додатних роботских јединица омогућава повећање флексибилности облика. Могућност променљивог растојања између стубова са аутоматским затезањем ужета омогућава систему да заузме произвољан облик и тиме огради одговарајући простор. На пример, систем може да заузме уски правоугаони облик који је погодан за кретање дуж пута, док са више стубова може да савлада и оштре кривине (слика 5.2).

По доласку на пашњак, стубови се удаљавају један од другог и формирају положај погодан за испашу. Након тога, систем остаје у изабраној позицији одређено време, уз минимално кретање потребно за управљање испашом. Систем је предвиђен да потпуно аутоматски одведе животиње на испашу и да их након испаше врати у шталу.

Свака роботска јединица се састоји од три главна дела - стуба, покретне платформе која носи стуб и подсистема за затезања ужета. Поред ових главних делова, роботску јединицу чине и други подсистеми у виду подсистема за комуникацију и подсистема за напајање.

Покретна платформа је беспосадно копнено возило UGV које може да се креће копном и плитком водом. Због своје робусне конструкције може да се креће по различитим теренима и тешким окружењима, чиме се омогућава ефикасна мобилност кроз умерено каменито поље, мека тла, ниску вегетацију, блато и падине. UGV садржи сензоре и комуникационе уређаје неопходне за навигацију, детекцију околине и комуникацију са другим јединицама са којима формира рој.



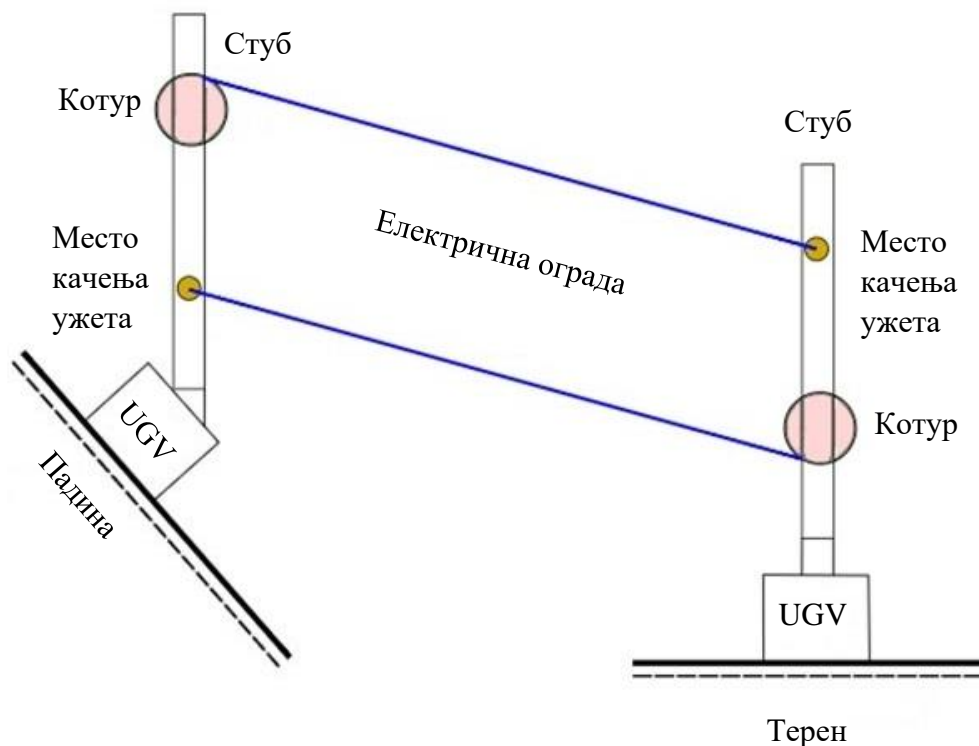
Слика 5.2 Кретање система до пашњака

Стуб је причвршћен за покретну платформу и служи да носи подсистеме за затезање ужета. Конструкционим решењем је омогућена ротација подсистема за затезање ужета око вертикалне осе како би роботске јединице могле да формирају неправилне облике док формирају систем оgrade, као и држање стуба у вертикалном положају.

Подсистем за затезање ужета се састоји из два котура на које се намотава ужад кроз коју се пушта импулсна струја. Ужад из једне роботске јединице су закачена за сензор силе суседне јединице тако да су јединице серијски међусобно повезане и формирају затворену петљу. На слици 5.3 је приказана веза роботских јединица. Веза роботских јединица се може прекинути између две суседне јединице како би се омогућио несметан улазак и излазак животиња из система.

Подсистем за напајање се састоји од извора једносмерне струје, уређаја који генерише импулсну струју и електронике која прилагођава напон од извора једносмерне струје до појединачних компоненти којима је потребно напајање. Уређај који даје струју високог напона у одређеним интервалима је прикључен на извор напајања, док се излаз

са кога се шаље импулсна струја поставља на ужад која чине електричну ограду при чему се ужад наизменично повезују на позитивне и негативне полове импулсног напајања. Ужад која формирају електричну ограду налазе се на одређеном растојању које се може подесити и по потреби затегнути одређеном силом како би се спречио њихов контакт и кратак спој услед кретања роботске јединице. Брзина намотавања или отпуштања ужади са котура синхронизована је са брзином кретања роботске јединице. Редним повезивањем роботских јединица формира се електрична ограда између најмање три роботске јединице, док су за померање стада потребне најмање четири роботске јединице.



Слика 5.3 Веза две роботске јединице

Подсистем за комуникацију обезбеђује поуздан пренос информација како би цео систем могао исправно да ради. Састоји се од више уређаја за комуникацију путем 3Г/4Г/5Г мреже као и путем бежичне везе.

За остваривање међусобне комуникације свака роботска јединица је опремљена уређајем за бежичну комуникацију, преко којих се размењују подаци који су добијени са различитих сензора или шаљу управљачки сигнали.

Комуникација између самоходног система и удаљеног корисника се остварује преко 3Г/4Г/5Г мреже. Ова веза обезбеђује двосмерни пренос података тако да корисник

може да види где се систем тренутно налази користећи локацију која је добијена путем GPS система, док преко камере која је постављена на роботској јединици може да надгледа животиње, или ако је потребно може и да утиче на рад целог система или само неког његовог дела.

Подсистем за комуникацију обухвата и уређаје који обезбеђују GPS лоцирање самоходног система. Свака роботска јединица је опремљена GPS модулом који служи за прецизно одређивање локације те јединице у реалном времену. Добијене позиције сваке роботске јединице се користе за одређивање растојања између њих као и за обавештавање корисника где се тренутно систем налази.

5.2 Функционални захтеви

За потребе развоја RoboShepherd система дефинисана је спецификација и урађена анализа захтева које систем треба да испуњава. Сва ограничења и захтеви који су дефинисани дати су у табели функционалних захтева (Табела 1).

Табела 1 Списак функционалних захтева и спецификација

<i>Број захтева</i>	<i>Име</i>	<i>Опис</i>
Ф31	Стубови и електрична ограда	Електрична ограда и стубови треба да буду вертикални.
Ф32	Синхронизација	Синхронизација позиција стубова у циљу формирања ограђене површине.
Ф33	Минимална површина	Површина дефинисана електричном оградом не сме бити мања од потребне за одређени број животиња које су унутар система, са минималном дужином и ширином између стубова.
Ф34	Гашење електричне ограде када је потребно	Ако је површина дефинисана електричном оградом мања од потребне, мора се угасити напајање електричне ограде.
Ф35	Престанак кретања	Обезбеђивање престанка кретања или кретање уназад у случају да је ограда у константном додиру са животињом (нпр. животиња је повређена или без свести).

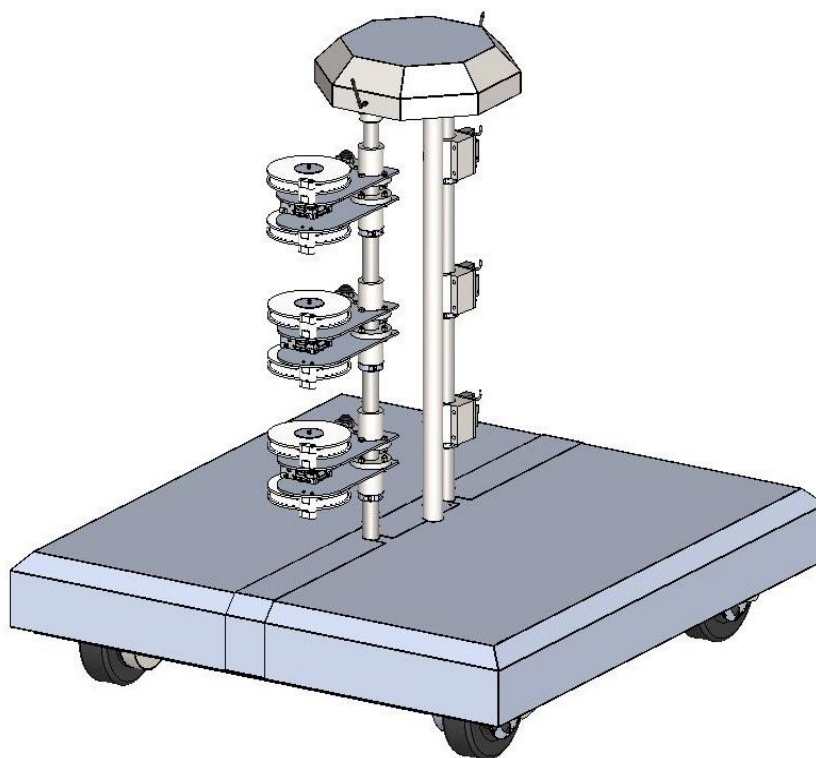
Ф36	Паркирање	Када нема животиња унутра система и задата је команда за паркирање, систем формира најмању површину са стубовима што је могуће ближе једних ка другима.
Ф37	Кретање током испаше	Минимална брзина кретања током испаше не сме бити већа од 1 km/h, систем се сме кретати само у кратким интервалима.
Ф38	Контрола кретања и управљања	Даљинско управљање кретања и контроле система RoboShepherd.
Ф39	Држање животиња унутар система	За држање животиње унутар система најниже уже ограде мора бити довољно близу земље, тако да животиње не могу да се провуку испод њега. Највише уже мора бити довољно високо, тако да животиње не могу да побегну прескачући га.
Ф310	Држање животиња ван система	Да би се дивље животиње, предатори и друге животиње држале ван система, најниже уже ограде мора бити довољно близу земље, тако да животиње не могу ући у штићену зону, пролазећи испод њега. Највише уже мора бити довољно високо, тако да животиње не могу ући у штићену зону прескачући га.
Ф311	Спајање/растављање	Стубови и ужади морају имати тачке за спајање и растављање, како би животиње могле да уђу унутар или да изађу ван система. Овај процес извршава људски оператер, при чему се напајање електричне ограде мора искључити.
Ф312	Водоотпорност	Систем мора да буде водоотпоран.
Ф313	GPS контрола	Систем се управља по GPS координатама јер мора да контролише кретање и испашу преко унапред дефинисаних површина према задатом временском распореду.

Ф314	Брзина система	Максимална брзина RoboShepherd система треба да буде као код човека који трчи, око 20 km/h.
Ф315	Аутономија система	Систем мора имати 24 сата аутономије у приправности и 10 сати аутономије кретања.
Ф316	Терен	Систем мора бити у стању да се креће на терену са нагибом од 5%.

6. Конструисање роботске јединице

Роботска јединица је развијана према дефинисаној спецификацији и анализи захтева урађених током пројекта. Сва ограничења и захтеви дефинисани у табели функционалних захтева (табела 1) су размотрени и узети у обзир током процеса конструисања. Поред тога, да би се обезбедила ефикасна производња прототипа, у процесу конструисања су узета у обзир сва ограничења приликом израда одређених позиција као и комерцијална расположивост стандардних машинских делова и материјала.

Конструисана роботска јединица (слика 6.1) се састоји од три главна подсистема: покретне платформе, подскопа за ослањање подсистема за затезање физичке везе и подсистема везе роботских јединица.

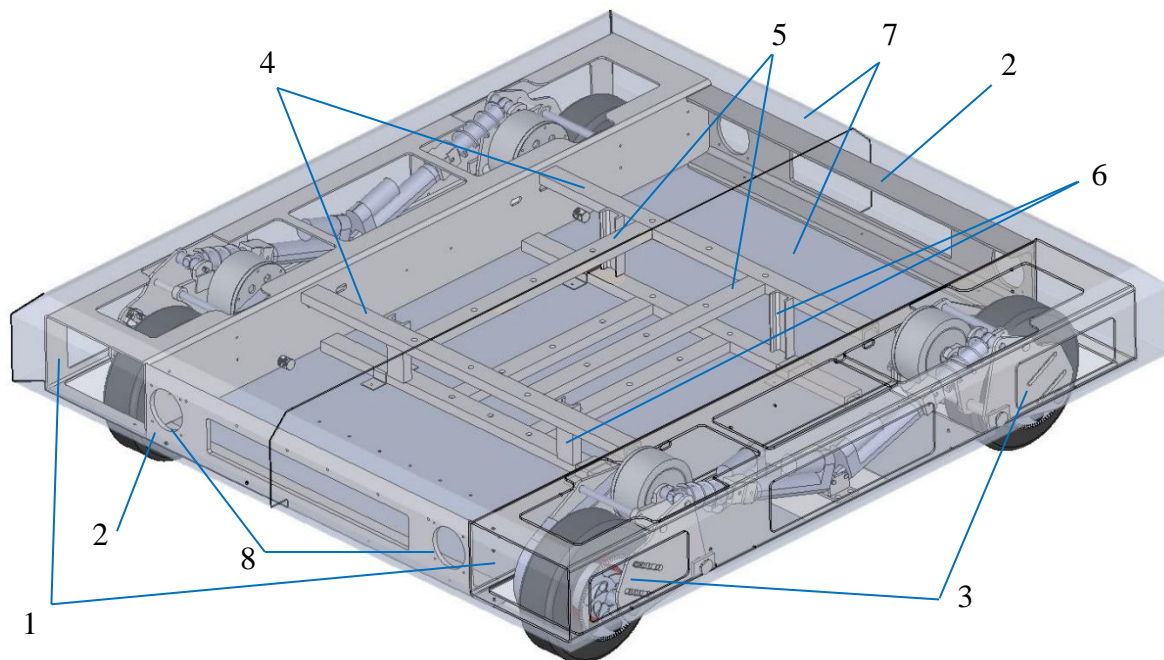


Слика 6.1 CAD модел пројектоване роботске јединице

6.1 Покретна платформа роботске јединице

Покретна платформа је подсистем који служи да обезбеди померање вертикалног стуба. Састоји се од рама у коме је позиционирана сва потребна електроника и батерија, подскопова точкова и штита.

Рам (слика 6.2) је направљен спајањем два бочна профила правоугаоног попречног пресека (1) који су заваривањем спојени са чеоним профилима (2). На бочним профилима се праве додатни отвори како би се обезбедило довољно места да се монтирају подсклопови точкова (3). Бочни профили се такође повезују са носачем вертикалног стуба. Овај носач се састоји од четири попречна (4) и четири уздужна профила (5) који су спојени заваривањем и по паровима распоређени у две паралелне равни. Попречни и уздужни профили из горње равни су са попречним и уздужним профилима из доње равни повезани вертикалним профилима (6). Са доње и горње стране рама је постављен штит (7) како би се штитиле компоненте у унутрашњости и спречио улазак воде, земље и других страних тела. На овај начин, рам обезбеђује одговарајућу крутост конструкције и пружа подршку свим осталим компонентама система. Такође, рам је пројектован тако да омогућава брзу монтажу и демонтажу вертикалног стуба помоћу 24 вијака. Величина рама је дефинисана према потребном простору за вертикални стуб у средини рама, четири подклопа точкова који се налазе у левој и десној страни рама и електронику у виду рачунара, батерије и разних драјвера. Пошто је батерија највећи део који је потребно поставити у рам, рам је конструисан тако да омогући несметано постављање батерије.



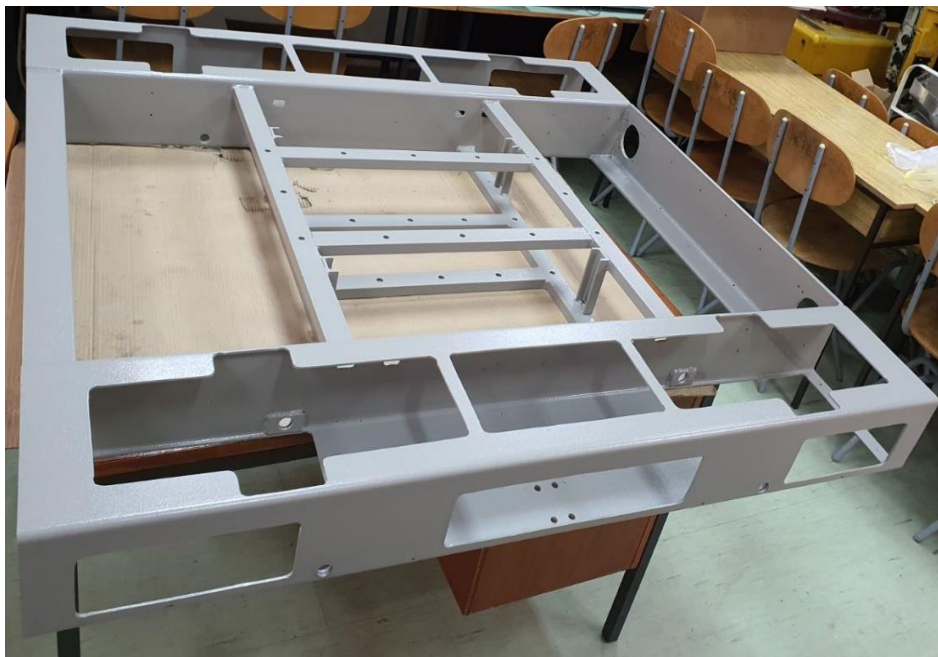
Слика 6.2 CAD модел рама, подсклопова точкова и провидни приказ штита

Како би се избегло драстично повећање температуре услед ослобађања топлоте са електронских компоненти и уређаја као и услед високих температура током топлих

месеци потребно је обезбедити принудно струјање ваздуха у покретној платформи, које се може остварити постављањем вентилатора. Током рада систем је цео дан изложен високим температурама и директном зрачењу сунца током доласка и одласка са пашњака, као и када стоји у развученој форми на пашњаку. Без вентилатора у унутрашњости покретне платформе температура може прећи 55°C што може довести до привременог отказивања рада батерије, као и трајног смањивања капацитета батерије. Такође, може доћи и до прегревања осталих електронских компоненти смештених у покретној платформи. Поред тога, вентилатори служе и да се избегне појава кондензације унутар покретне платформе, јер формирају струјање ваздуха кроз унутрашњост саме платформе. Како би се решили ови проблеми, на чеоним профилима (2) су направљени отвори (8) који служе да се поставе вентилатори. На сваком профилима се налазе по два вентилатора који остварују принудно струјање ваздуха у унутрашњости покретне платформе.

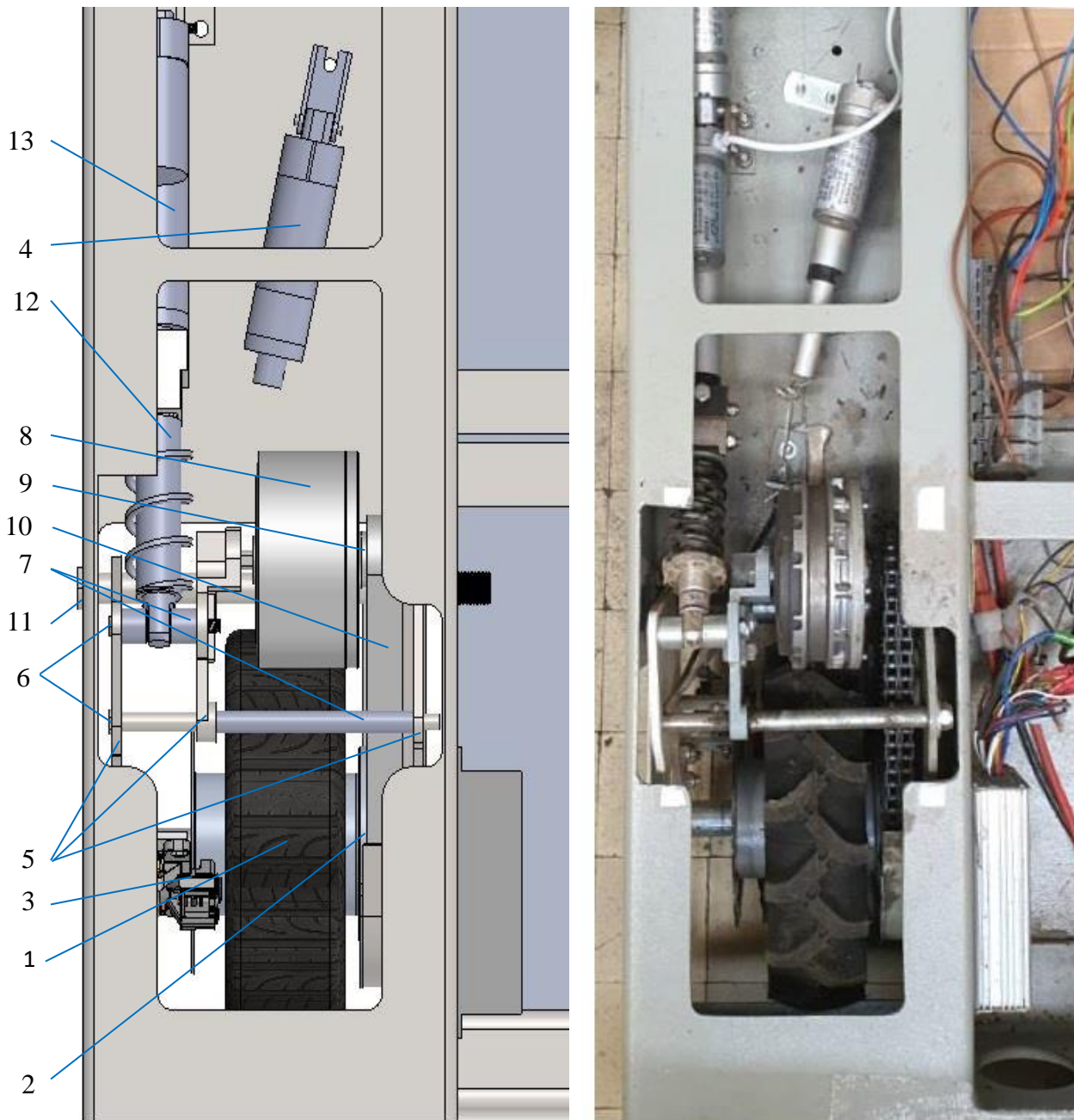
Са унутрашње или спољашње стране горњег дела штита постављена је термоизолација. Ова термичка изолација додатно помаже приликом елиминисања температурних утицаја околине на роботску јединицу. Улога термоизолације је и да услед ниских спољних температура спречи пад температуре унутар роботске јединице како би се заштитиле електронске компоненте као и батерија од привременог губитка капацитета.

На слици 6.3 је приказан израђен подсклоп рама роботске јединице.



Слика 6.3 Подсклоп рама

Свака роботска јединица има четири независна погона у виду подсклопова точкова. Ови подсклопови имају троструку функцију – омогућавају кретање, промену растојања од тла и промену нагиба роботских јединица.

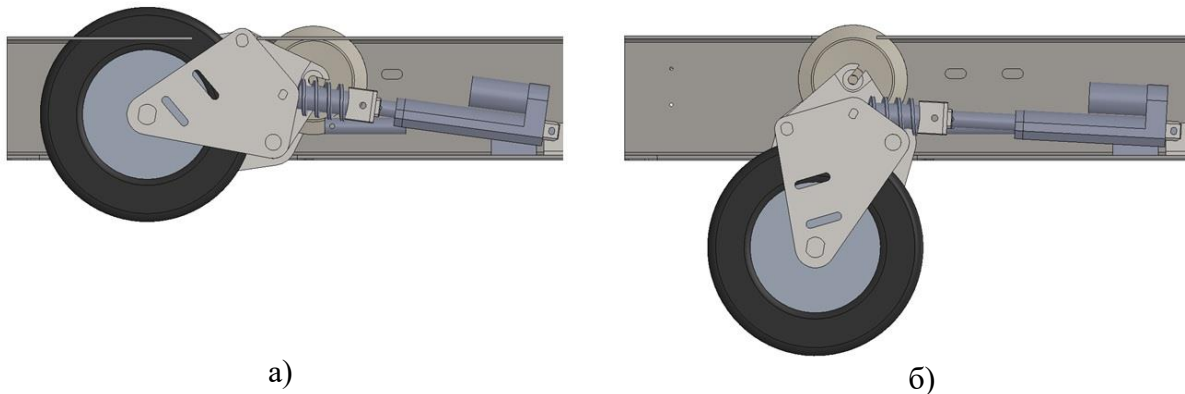


Слика 6.4 Подсклоп точка - CAD модел и израђени подсклоп точка

Подсклоп точка (слика 6.4) се састоји од точка (1) (гуме, наплатка и лежајева) који је са једне стране спојен са гоњеним ланчаником (2), а са друге диск кочницом (3). Активирање кочнице се врши преко малог линеарног актуатора (4). Носећи механизам се састоји од 3 виљушке (5) у виду паралелних плоча различите геометрије које су спојене везним осовинама (6) и дистанцерима (7). За електромотор (8) је спојен погонски

ланчаник (9) који преко ланца (10) врши окретање точка (1). Избор ланчаног преноса, као решења за пренос снаге, је усвојен након детаљног разматрања предности и мана различитих решења током пројектовања самог подскопа точка, а у складу са функцијом коју треба да извршава. Овакав тип преноса се често користи за пренос снаге на точкове, посебно код бицикала и мотоцикала.

Носећи механизам се са доње стране везује за конструкцију рама преко главне осовине (11), док се са горње стране везује преко везне осовине (6) за елемент за пригушење вибрација (12) који је даље повезан са великим линеарним актуатором (13). Померањем клипа великог линеарног актуатора (13) преноси се кретање преко елемента за пригушење вибрација (12) и везне осовине (6) на носећи механизам који даље ротира око главне осовине (11) при чему долази до извлачења или увлачења комплетног подскопа точка из покретне платформе (слика 6.5). На овај начин је могуће мењати растојање роботске јединице од тла.



Слика 6.5 Промена висине роботске јединице – а) минимална, б) максимална висина

6.2 Подсклоп за ослањање подсистема за затезање физичке везе

Подсклоп за ослањање подсистема за затезање физичке везе сваке роботске јединице је пројектован у виду вертикалног носећег стуба. Како би се омогућило формирање електричне ограде, вертикални носећи стуб са једне стране носи подсистеме за затезање ужади, док са друге стране носи подсклопове сензора силе. Ограда се формира тако што су електрични проводници који крећу од подсклопа уређаја за затезање ужета са првог стуба закачени за сензор силе на следећем стубу, понављајући поступак све до задњег стуба, са ког су закачени на први стуб, како би се добила затворена ограда. Пошто Roboshepherd треба да испуни различите захтеве у току кретања, вертикални носећи стуб је развијен у складу са тим захтевима. Основни захтеви које развијени подсклоп мора да испуни су могућност одржавања вертикалне позиције у односу на нагиб терена, као и могућност једноставне монтаже и демонтаже одговарајућег броја подсистема за затезање ужета.

6.2.1 Нагиб подсклопа за ослањање подсистема за затезање физичке везе

Постоји више техничких решења која би могла бити искоришћења за промену нагиба вертикалног носећег стуба. Нажалост, већина ових решења омогућава нагиб само на једној страни, док нагиб вертикалног носећег стуба роботске јединице треба да буде вишесмеран. Како би се обезбедио потребан број степени кретања вертикалног носећег стуба, разматрана су комплекснија решења која обухватају два, три или више линеарних актуатора који су постављени испод платформе, док се са друге стране платформе поставља вертикални носећи стуб који може да се нагиње у неколико праваца. Ако то решење захтева, уместо линеарних актуатора могу се користити различите врсте механизма и механичких веза без погона, а које мануелном операцијом могу да доведу платформу у жељени положај.

Пошто се Roboshepherd углавном креће по руралним подручјима, готово је немогуће користити хидраулички или пнеуматски погон за нагиб вертикалног носећег стуба, пошто би у том случају роботска јединица морала да носи и додатну опрему за хидраулику или пнеуматику попут резервоара или компресора, тако да су у наставку пројектовања разматрани само електрични типови погона.

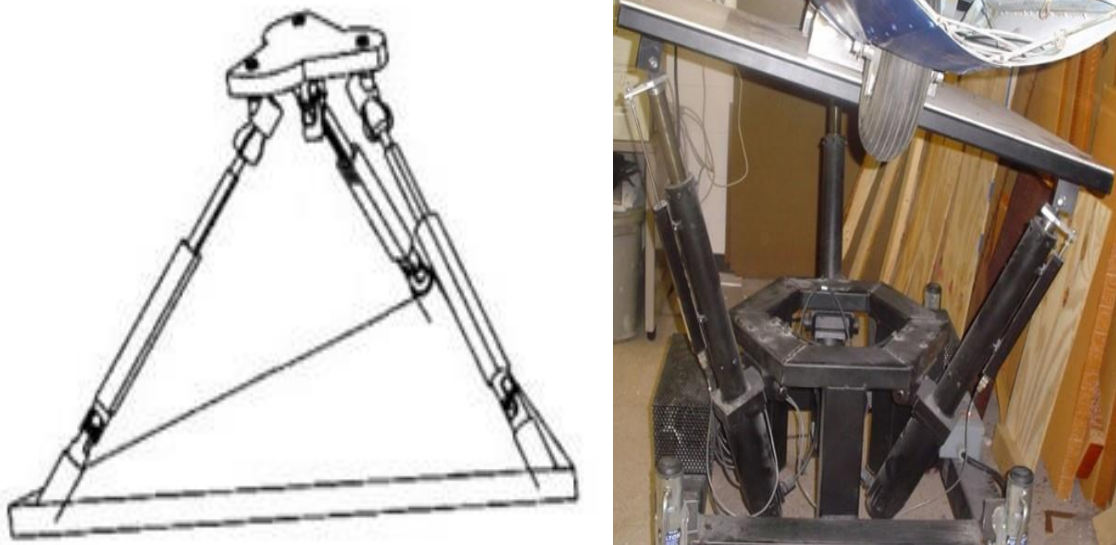
На слици 6.6 је приказано најједноставније решење које је разматрано - решење са два актуатора. Ово решење се састоји од једне фиксне централне шипке непроменљиве дужине са сферним или универзалним зглобом који је повезује са

платформом и два актуатора. Променом дужине једног или оба актуатора обезбеђује се вишесмерни нагиб платформе, а самим тим и промена нагиба вертикалног носећег стуба који би носила платформа.



Слика 6.6 Подешавање нагиба са 2 линеарна актуатора [81]

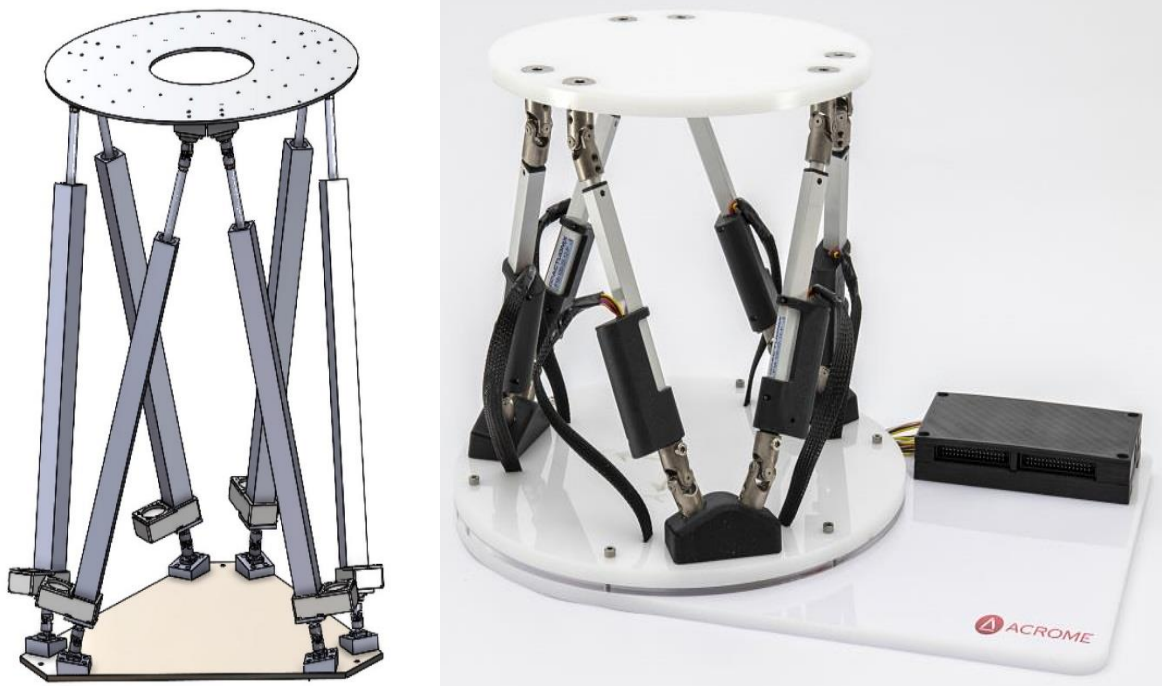
На слици 6.7 је приказано комплексније решење подешавања нагиба са три актуатора. Пошто су за платформу закачена три актуатора који имају могућност мењања дужине, ово решење омогућава и раванско кретање платформе поред могућности нагиба платформе.



Слика 6.7 Подешавање нагиба са 3 линеарна актуатора [82]

Једно од најсложенијих решења за промену нагиба је Стјуартова платформа која је приказана на слици 6.8. Ова платформа се састоји од шест електричних линеарних

актуатора, по 2 у пару како би се повећала носивост платформе. Актуатори су са једне стране закачени за непокретну основу, а са друге стране за платформу чијим кретањем треба управљати. Угао између линеарних актуатора и непокретне основе се разликује од решења до решења. Платформа се може кретати планарно или може мењати нагиб у више праваца у складу са жељеном променом угла.

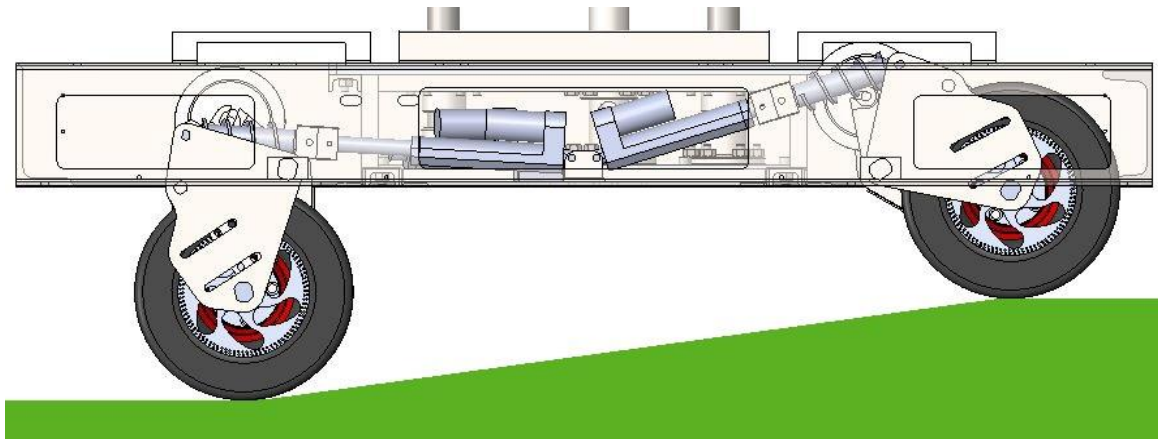


Слика 6.8 Стјуартова платформа [83], [84]

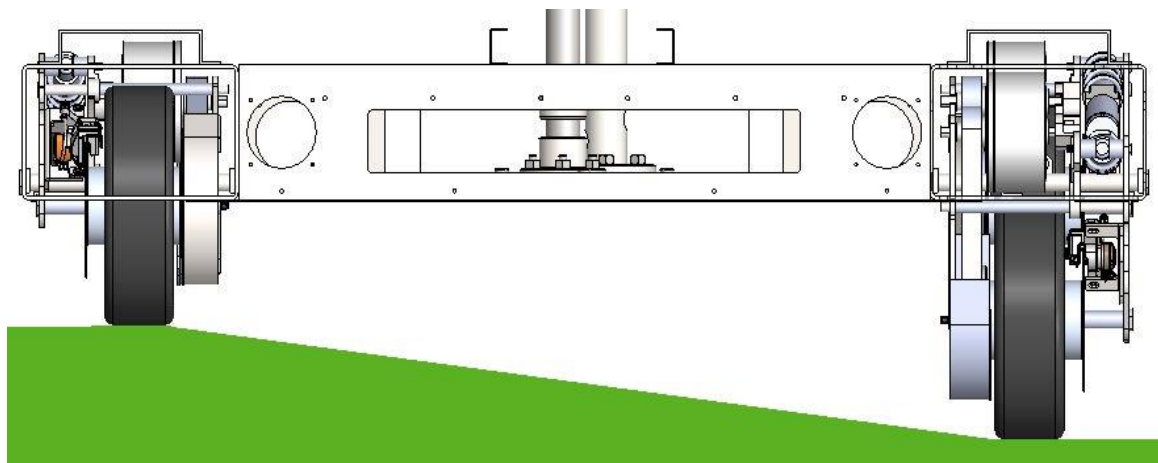
Разматрана решења коришћењем линеарних актуатора су задовољила захтеве којима се омогућава да се подсклоп вертикалног носећег стуба одржава у вертикалном правцу током кретања роботске јединице по теренима различитих нагиба. Са друге стране, применом ових решења јавља се проблем везан за висину роботске јединице. Коришћење неког од разматраних решења би довело постављање вертикалног носећег стуба, а самим тим и електричне оgrade, на висину која није у складу са минимално потребном висином електричне оgrade која је изложена у поглављу 4.2. Због тога ниједно од разматраних решења није усвојено.

Као решење усвојено је да се и за нивелацију вертикалног носећег стуба користи подсклоп точка уз помоћ кога је могуће мењати висину роботске јединице. Ово је могуће зато што се промена растојања роботске јединице од тла може вршити независно у четири тачке, што контролисаном променом положаја клипа појединачних линеарних актуатора може довести до ротације рама роботске јединице око бочног и подужног правца, а тиме и промена нагиба рама у бочном и подужном правцу у односу на подлогу

по којој се креће сама роботска јединица. Променом положаја клипа појединих линеарних актуатора може се остварити да рам роботске јединице буде увек хоризонталан у односу на бочни и подужни правац. На исти начин се дефинише и нагиб рама роботске јединице у односу на суседне роботске јединице међусобно повезане електричном оградом. На овакав начин је могуће остварити и паралелност електричне ограде са тлом по коме се креће цео систем. Оваквим променама могуће је кориговати нагибе терена од 14% у подужном (слика 6.9) и 12% у бочном правцу (слика 6.10).



Слика 6.9 Корекција нагиба у подужном правцу



Слика 6.10 Корекција нагиба у бочном правцу

6.2.2 Ротација подскопа за ослањање подсистема за затезање физичке везе

Током истраживања испитивана су различита комерцијална техничка решења која би могла да се користе за ротацију вертикалног носећег стуба. Након даљег истраживања и развоја подсистема за затезање ужета дошло се до закључка да ротација вертикалног носећег стуба није неопходна за рад целог система, тако да се одустало од развоја ове карактеристике стуба.

6.2.3 Конструисање подсклопа за ослањање подсистема за затезање физичке везе

Вертикални носећи стуб је конструисан према дефинисаној спецификацији и анализи захтева урађених током пројекта. Сва ограничења и захтеви који су дефинисани у табели функционалних захтева (табела 1) као и потребна висина и густина електричне ограде коју је потребно формирати према препорукама које су дате за различите врсте животиња у поглављу 4.2, су размотрени и узети у обзир током процеса конструисања.

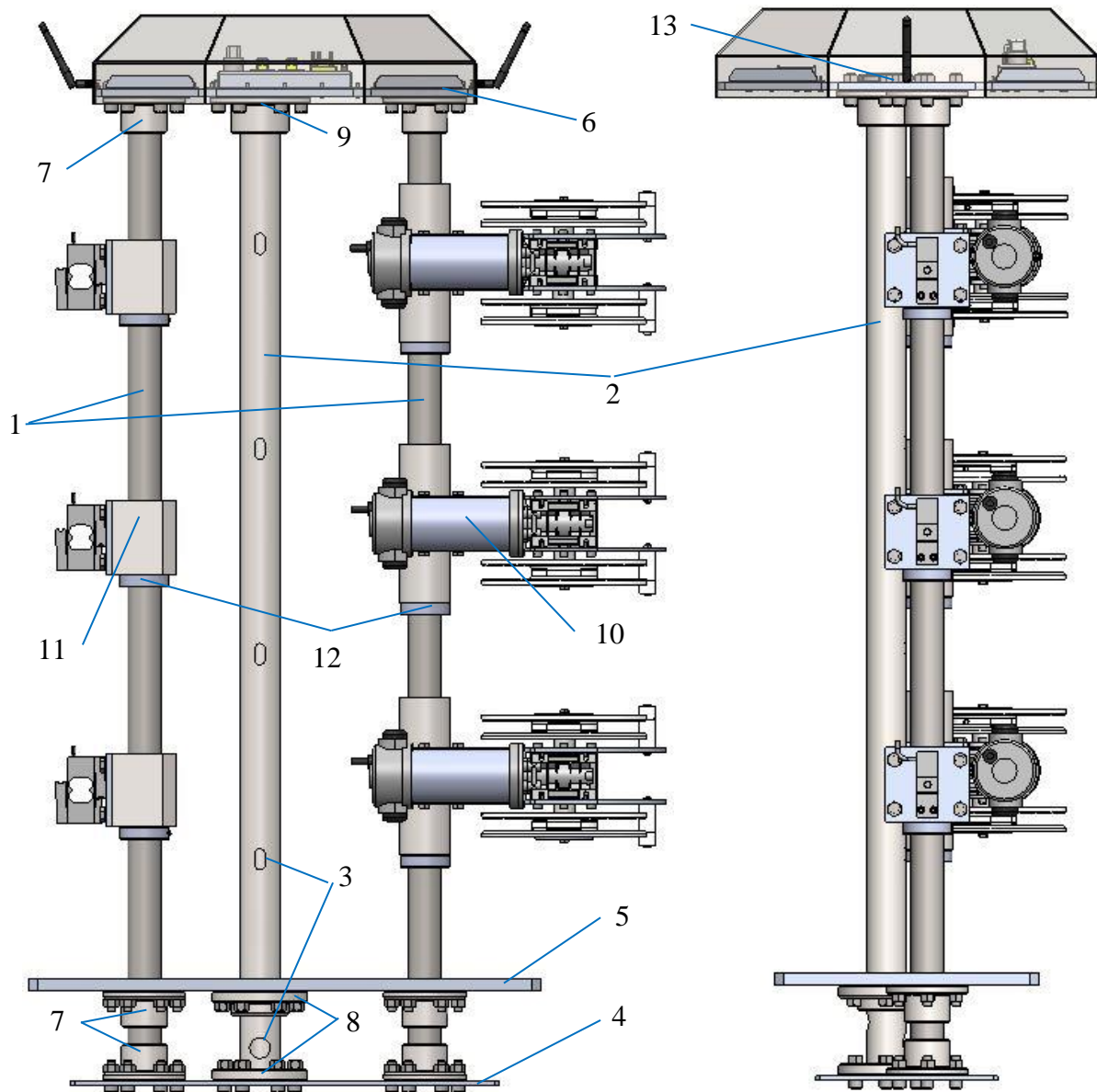
Подсклоп вертикалног носећег стуба се састоји од више подсклопова и делова који заједно чине једну целину. Вертикални носећи стуб (слика 6.11) обухвата две паралелне линеарне вођице (1) кружног или прстенастог попречног пресека и носећи елемент (2) при чему су сви постављени у вертикалном правцу. Да би се повећала крутост подсклопа вертикалног носећег стуба, осе линеарних вођица и оса носећег елемента нису у истој вертикалној равни.

Носећи елемент (2) је циљано изабран да буде прстенастог попречног пресека како би се олакшао цео подсклоп и омогућио простор за пролаз електро инсталација. На њему је пројектовано више бочних отвора (3) који омогућавају да каблови напајања, сензора и др. прођу кроз унутрашњост овог елемента и кроз предвиђене отворе изађу ван њега и дођу до одговарајућих уређаја.

Вертикални носећи стуб обухвата три хоризонталне плоче: доњу плочу (4), средњу плочу (5) и горњу плочу (6). Ове плоче су међусобно паралелне и постављене на одређеном растојању. Обе линеарне вођице су са хоризонталним плочама повезане уз помоћ вијака преко прирубница (7). Како би се обезбедила константна удаљеност између доње и средње плоче, за носећи елемент (2) су заварене прирубнице (8) на одређеној удаљености, за које се вијчаном везом спајају хоризонталне плоче (4 и 5), док се горња плоча са једне стране повезује преко прирубнице (9). Горња плоча на средини има и отвор кроз који пролази носећи елемент (2) који на крају има нарезан навој. Стављањем навртке (13) обезбеђује се додатно повезивање горње плоче и носећег елемента.

На једну линеарну вођицу се монтирају подсклопови уређаја за затезање ужета (10), док се на другу монтирају подсклопови сензора силе (11), чије се кретање у вертикалном правцу обезбеђује аксијалним осигурачима (12) који се постављају испод сваког од њих. Број подсистема за затезање ужета који ће бити монтирани је променљив и зависи од врсте животиња које систем треба да води и доводи са испаше. Према препорукама које су дате за различите врсте животиња у поглављу 4.2, могуће је

поставити од 1 до 4 подсистема који формирају електричну ограду. Минимална висина електричне ограде коју је могуће постићи износи 350 mm, док је могуће постићи максималну висину ужета од 1400 mm. Број подклопова сензора силе је исти као број подклопова уређаја за затезање ужета и увек се монтирају у пару.

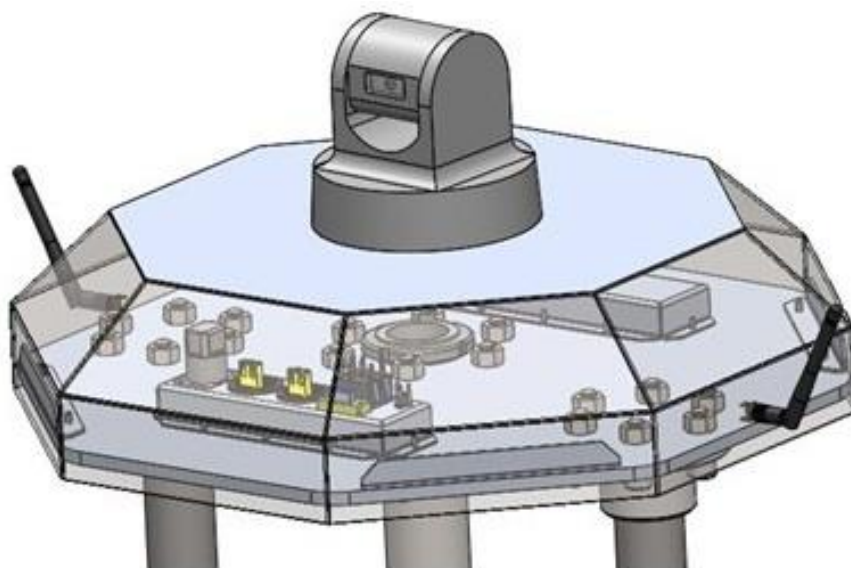


Слика 6.11 CAD приказ вертикалног стуба у две пројекције

На горњој плочи је монтиран сет са конекторима и прекидачима и подклопом куполе (слика 6.12). Овај сет обухвата прекидач којим се укључује и искључује роботска јединица, више различитих врста конектора преко којих се може пунити батерија или вршити дијагностика система. Такође, преко ових конектора се може приступити

рачунару у роботској јединици ако је потребно извршити унос или промене одређених параметара у случају када то није могуће урадити преко удаљеног приступа.

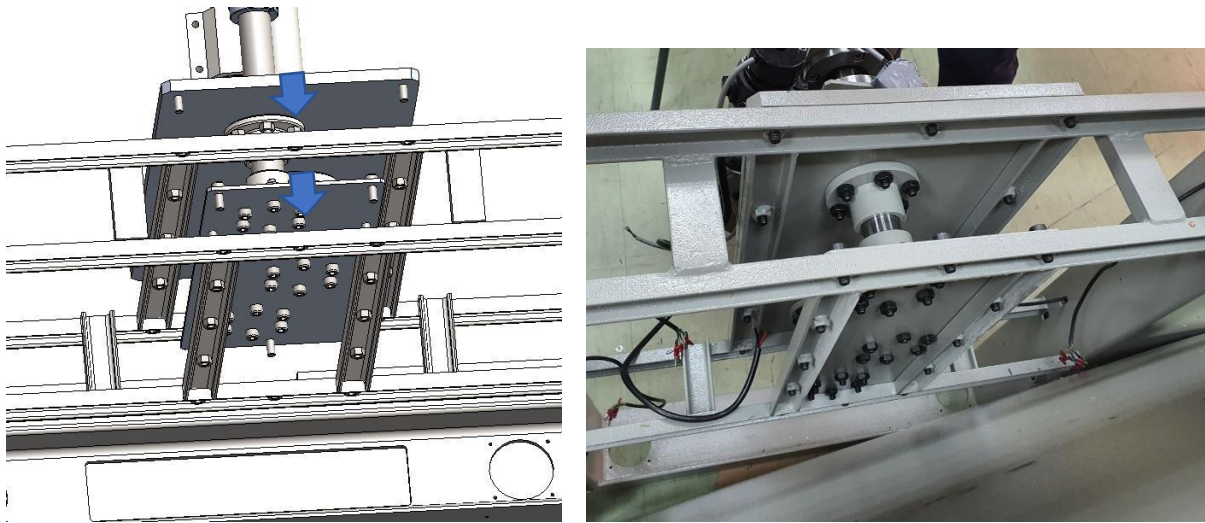
Подсклоп куполе се састоји од зида куполе и поклопца куполе, који су међусобно повезани поступком заваривања. На зиду куполе се налазе држачи преко којих је подсклоп куполе повезан са горњом плочом. На куполи се монтирају потребне антене за бежичну комуникацију између роботских јединица и за GPS навигацију, док се на једној роботској јединици на поклопцу куполе монтира и камера која служи за даљински видео надзор животиња и околине. Купола служи и да спречи продор атмосферских падавина и нечистоћа у унутрашњост вертикалног носећег стуба као и да заштити електронске компоненте које се налазе на горњој плочи.



Слика 6.12 CAD приказ куполе са електронским компонентама

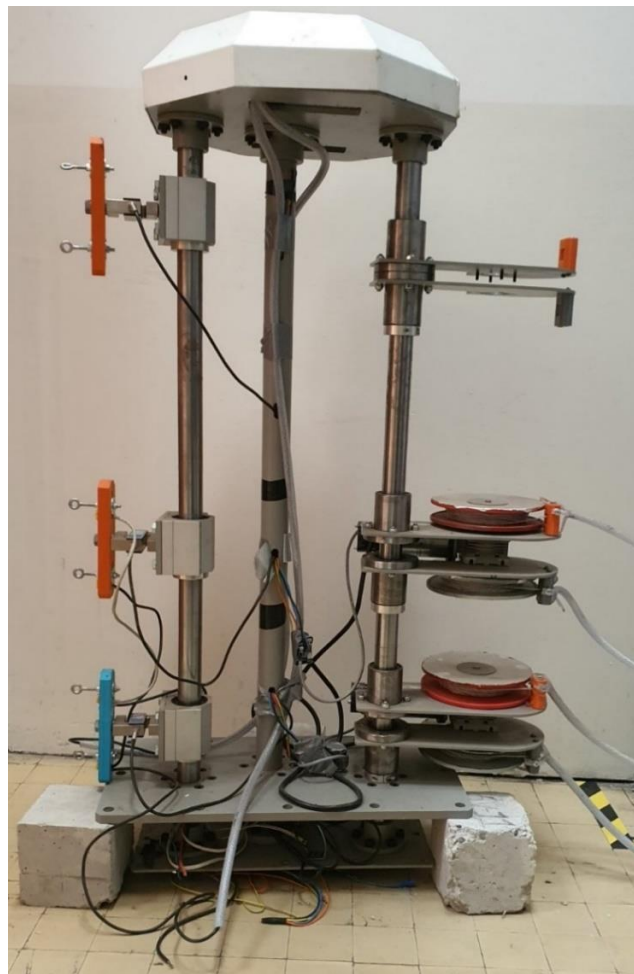
Како би се омогућило једноставно склапање и по потреби расклапање роботске јединице, приликом пројектовања покретна платформа и вертикални носећи стуб су развијани као две одвојене целине, односно као два засебна подклопа који се прво независно склопе, а након тога коначно заједно склопе у роботску јединицу. Да би се омогућила довољна робусност конструкције, а истовремено брза и ефикасна монтажа вертикалног носећег стуба на рам покретне платформе, доња плоча је пројектована да буде мањих димензија у односу на средњу плочу, како би могла да прође кроз горњи део рама и налегне на доњи део рама. Након постављања, цео вертикални носећи стуб се са 24 вијака преко доње и средње плоче спаја са рамом покретне платформе. Како би се процес додатно убрзао, вијци се спајају са наврткама које су претходно заварене за рам.

На слици 6.13 је приказан CAD модел вертикалног носећег стуба и рама у току спајања, као и реалан склоп прототипа.



Слика 6.13 Спој вертикалног носећег стуба и рама

Израђен подсклоп вертикалног носећег стуба је приказан на слици 6.14.



Слика 6.14 Подсклоп вертикалног носећег стуба

7. Подсистем везе роботских јединица

Системи за затезање ужета се могу наћи у различитим мехатроничким системима као главни подсистеми. Ови системи се могу наћи у машинама у текстилној индустрији [85], дизалицама [86], производњи папира [87], медицини [88] итд. У зависности од намене, системи за затезање ужади или жица се генерално могу поделити у две групе: системи са константним затезањем и системи са променљивим затезањем [89], при чему се системи са константним затезањем користе у областима као што су штампа и производња папира, док се системи са променљивим затезањем могу користити у областима где се жица може намотавати/одмотавати на витлу или катуру. Развојем и управљањем оваквим системима бавили су се многи истраживачи, а у наставку ће бити представљена нека од ових истраживања.

У раду [90] је дефинисан општи математички модел система за намотавање/одмотавање кабла за више различитих конструкција, при чему су теоријски и симулациони резултати потврђени кроз експерименталну анализу једне нове конструкције система за намотавање/одмотавање кабла. Феномен нелинеарне и импулсне природе динамичког процеса намотавања/одмотавања ужета на витлу анализиран је у раду [91]. У раду [92] је приказан алат за одређивање односа амплитуда-фреквенција нелинеарног осцилатора, где је као пример за процес решавања коришћена вибрација жице.

У раду [93] је приказан развијен уређај за одмотавање кабла како би се пратило понашање одмотавања кабла у различитим условима одмотавања. У раду [94] је предложена нова метода контроле затезања за машину за намотавање, која може да регулише затегнутост влакана и брзину процеса намотавања регулацијом три различита погонска ваљка. Техника за оптимизацију профила жице који генерише аутоматизована машина за намотавање жице приказана је у раду [95]. У раду [96] је предложен приступ на бази динамике више тела за моделирање и симулацију великог робота са кабловима, узимајући у обзир тежину каблова.

У раду [97] је представљен производни метод који омогућава да се коришћењем намотавања каблова и индустријских робота олакша производња електричних машина. Предложени метод је валидиран путем компјутерских симулација и експеримената са намотавањем. У раду [98] је пројектован, развијен и тестиран иновативни минијатуризовани механизам за примену код хаптичких апликација или хируршких

робота. Истраживање за контролу затезања проводника код машине која служи за намотавање правоугаоних калемова је дато у раду [99].

У раду [100] је представљена развијена машина за намотавање филамента која може да мери и контролише силу затезања током намотавања коришћењем PID (*енгл. Proportional Integral Derivative*) контроле. Систем контроле затегнутости влакна који је развијен на бази повратне спреге са програмабилним логичким контролером PLC (*енгл. Programmable Logic Controller*) представљен је у [101].

У раду [102] је приказано развијено управљање за затезање жице код машине за намотавање, са могућношћу процене затегнутости жице како би се омогућила имплементација контроле затегнутости жице без сензора. У раду [103] је приказан систем управљања на основу повратне спреге за више-моторни систем за намотавање без сензора који мери силу затезања. У раду [104] је представљено управљање базирано на контролеру са два степена слободе, за затезање код система за намотавање код кога је потребно независно управљати брзином и силом затезања.

У раду [105] је истраживан и приказан реализован систем управљања затегнутости на бази повратне спреге, где је неуронска мрежа примењена на систем како би се превазишли недостаци традиционалног PID метода. У раду [106] је представљена нова управљачка шема за процес намотавања спиралних опруга од жице, на машини која је рачунарски нумерички управљана. Како би се одржала уједначена затегнутост жице током процеса намотавања, коришћена је унапређена пропорционално интегрална неуронска мрежа.

Код система RoboShepherd физичка веза између роботских јединица је остварена коришћењем ужади која се каче од једне до друге роботске јединице и формирају ограду. Променљивост физичке везе са становишта дужине је омогућена скраћивањем или продужавањем ужади. Поред тога, физичка веза има и раванско померање што омогућава физички повезаним роботским јединицама да заузму различите облике. Како би се ово омогућило развијен је подсистем везе у виду подсистема за затезање ужета. У складу са тим у наставку доктората ће се говорити о подсистему за затезање ужета.

Подсистем за затезање ужета који је развијен за потребе система RoboShepherd припада системима са променљивим затезањем где се у току рада уже намотава или одмотава са котура. Основни задатак који подсистем за затезање ужета треба да испуни је да омогући формирање конвексних и неконвексних облика електричне ограде. Поред тога, инсталацијом више оваквих подсистема за затезање ужета на стуб роботске јединице, омогућава се повећање густине и укупне висине електричне ограде, док је у

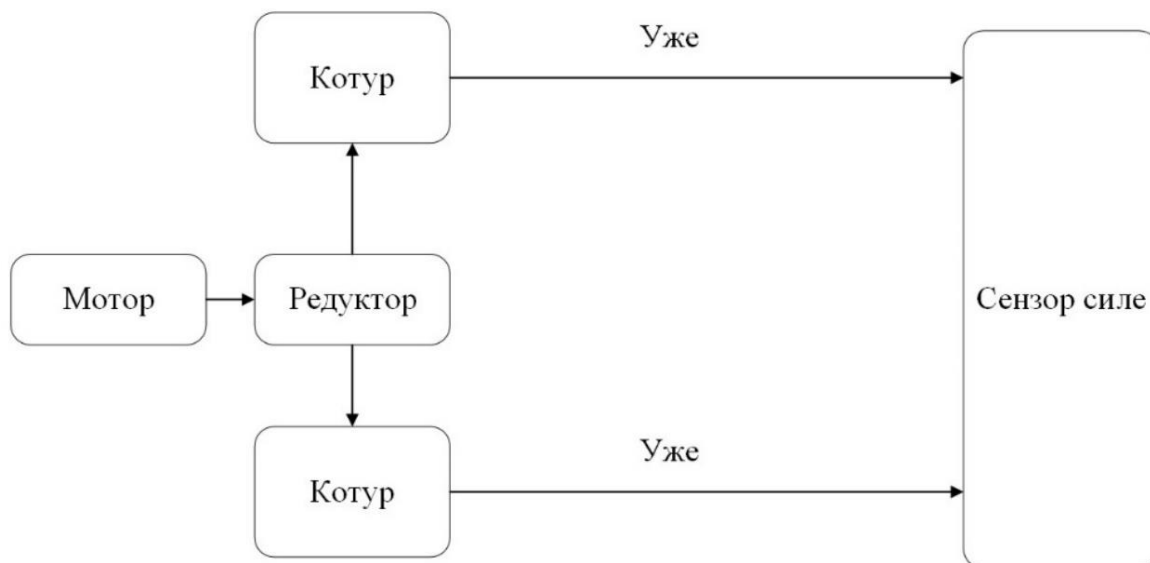
исто време могуће и фино подешавање електричних проводника по висини како би се електрична ограда оптимално подесила.

7.1 Конструисање подсистема за затезање ужета

Подсистем за затезање ужета се састоји из следећих подсклопова и система:

- Подсклопа уређаја за затезање ужета;
- Подсклопа сензора силе;
- Система за аквизицију података;
- Система за управљање затезањем ужета.

Електрични проводници у виду вишеслојног уплетеног ужета које се састоји од пластичних нити и металних жица из једне RoboShepherd роботске јединице су закачене за подсклоп сензора силе суседне роботске јединице, тако да су јединице серијски међусобно повезане и формирају затворену петљу. Шематски приказ подсистема за затезање ужета приказан је на слици 7.1.

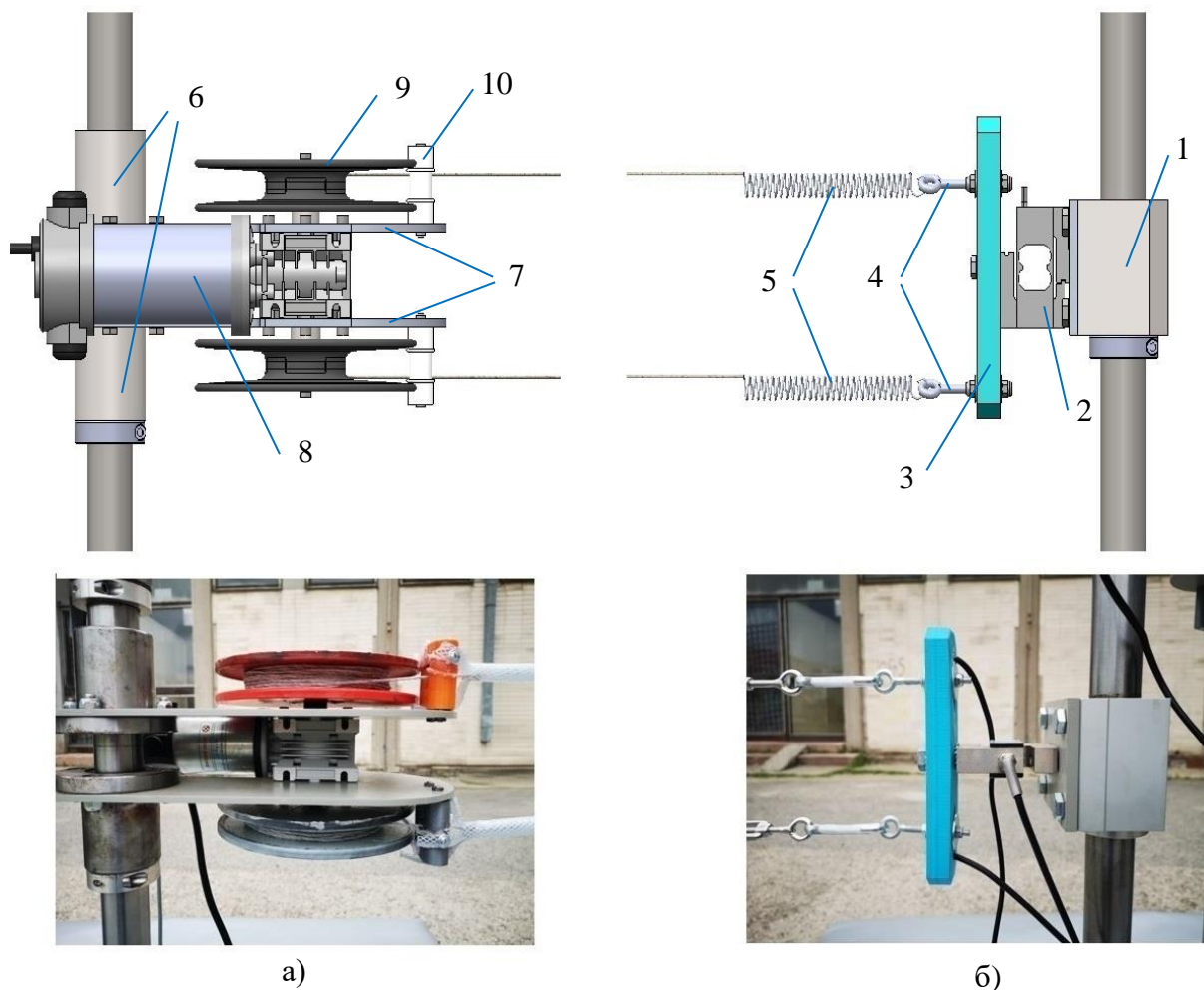


Слика 7.1 Шематски приказ подсистема за затезање ужета

Подсклоп сензора силе (слика 7.2б) се састоји од линеарног лежаја са кућиштем (1) преко којег се монтира на вођицу вертикалног носећег стуба, сензора силе (2), изолационе плоче (3), кука (4) и опруга (5). Сензор силе мери силу у пару ужади, која је један од главних контролних параметара управљачког система RoboShepherd-а. Изолациона плоча спречава пренос електричног импулса у ужадима до роботске јединице. Опруге компензују промену растојања између роботских јединица и на тај

начин утичу на затегнутост ужета и дужину ужета услед вибрација које настају током кретања роботске јединице.

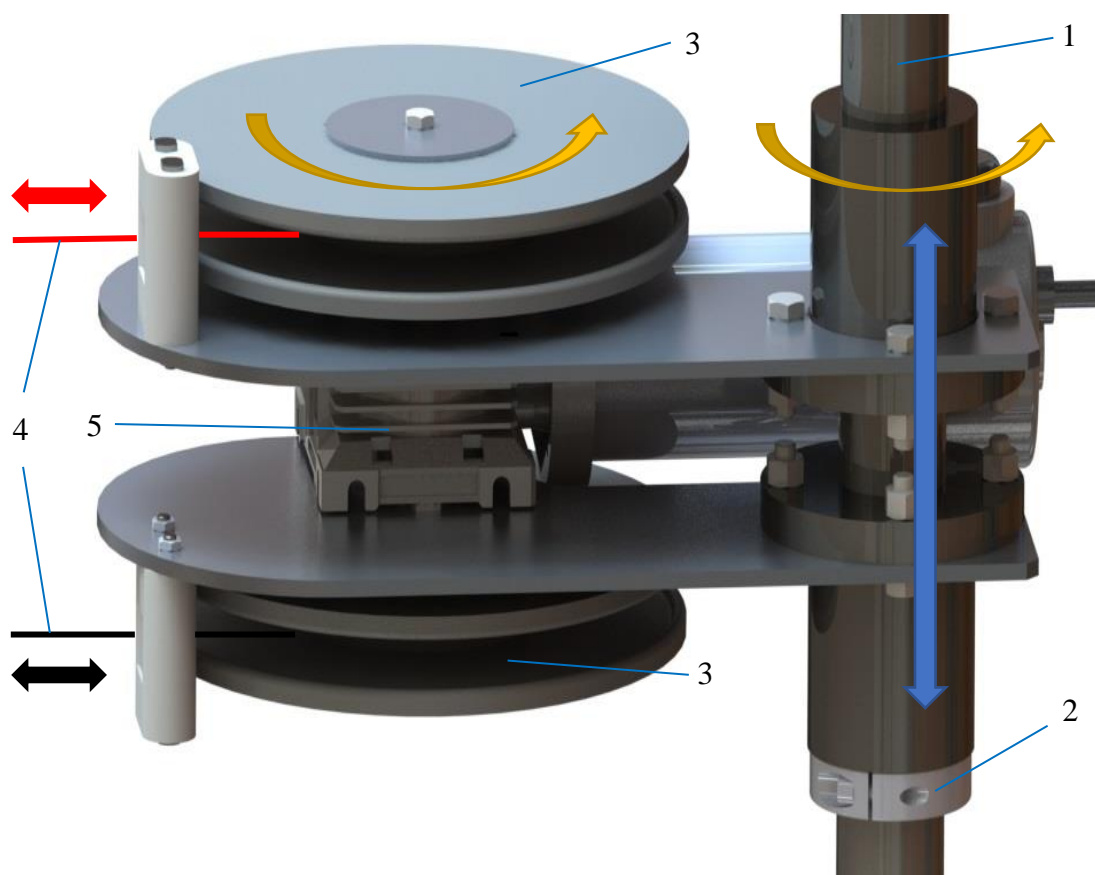
Подсклоп уређаја за затезање ужета (слика 7.2а) се састоји од два линеарна лежаја са кућиштем (6) преко којих се монтира на другу вођицу вертикалног носећег стуба на истој висини са одговарајућим подсклопом сензора силе. Лежајеви (6) се вијчаном везом спајају са две плоче (7) између којих се поставља мото-редуктор (8). На редуктору се монтира двострано вратило на које се постављају котурови (9) на које се намотава ужад. Котурови су направљени од изолационог материјала како би се спречио пренос електричног импулса на мото-редуктор. У неким случајевима када постоји висинска разлика између две роботске јединице, коју није могуће компензовати променом висине саме роботске јединице уз помоћ подскопа точка, може доћи до испадања ужета ван котура током намотавања. Како би се ово спречило, испред сваког котура је постављен уводник (10) кроз који пролази уже. Уводник је такође направљен од изолационог материјала како би се спречио пренос електричног импулса на роботску јединицу.



Слика 7.2 Подсистем за затезање ужета

Као што је већ напоменуто подсклоп уређаја за затезање ужета и подсклоп сензора силе могу слободно да се ротирају око осе линеарних вођица. Тиме се обезбеђује формирање конвексних и неконвексних облика електричне ограде без обзира на положај једне роботске јединице у односу на другу, јер уже због затегнутости увек изазива самоподешавање подсистема за затезање ужета, односно усмерава подсклоп уређаја за затезање ужета са једне роботске јединице ка подсклопу сензора силе на другој роботској јединици.

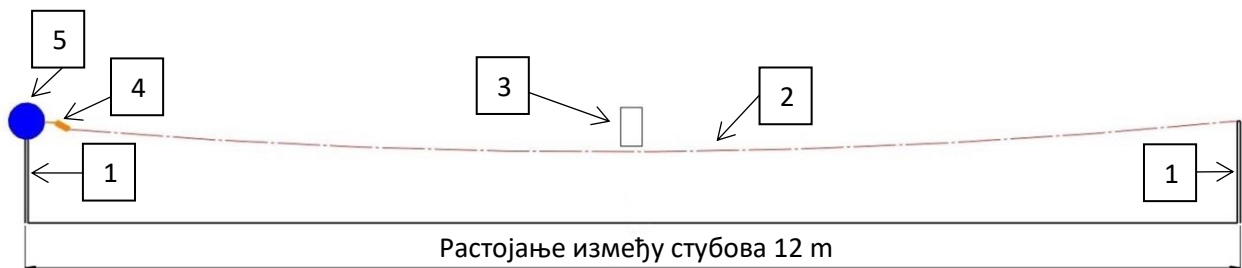
Фото-реалистичан приказ уређаја за затезање ужета са могућим померањима дат је на слици 7.3. Свака роботска јединица је конструисана тако да буде опремљена са до четири уређаја за затезање ужета по вертикалном стубу. Уређај за затезање ужета може да се ротира око стуба (1) што зависи од положаја роботске јединице са којом је повезан. Аксијално осигурање у вертикалном правцу врши се аксијалним осигурачем (2) који се налази са доње стране уређаја за затезање ужета. На тај начин се дефинише вертикални положај уређаја за затезање ужета како би био у одговарајућем положају са подсклопом сензора силе који се налази на другој роботској јединици. Два котура (3) са ужади (4) налазе се са горње и доње стране у односу на мото-редуктор (5) који затеже ужад.



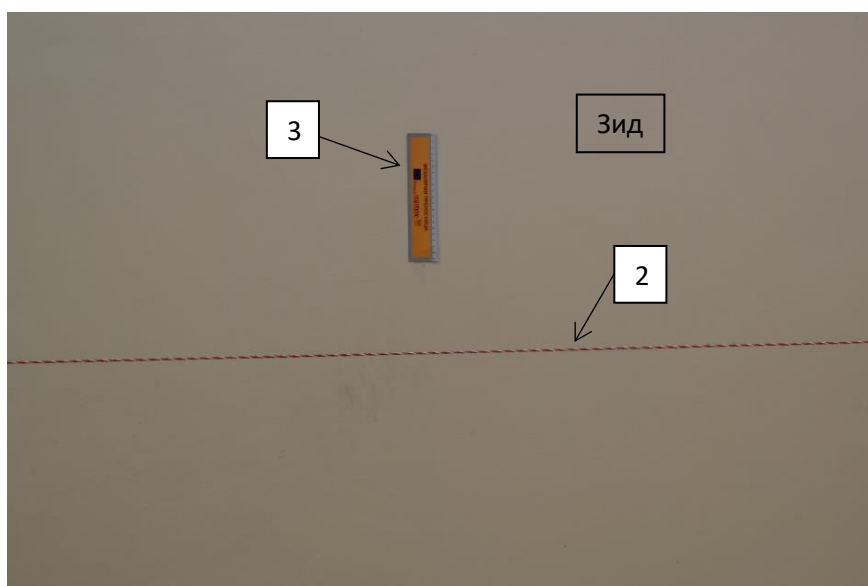
Слика 7.3 Фото-реалистичан приказ уређаја за затезање ужета

7.2 Одређивање потребне силе затезања ужета

Када се уже за електричну ограду развуче од једне до друге роботске јединице, оно се угиба услед сопствене тежине. Због овог угиба потребно је одредити силу затезања која обезбеђује да не дође до додиривања ужади која формирају електричну ограду, односно потребно је обезбедити да вредност угиба ужета буде у одређеним границама. Да би се утврдила потребна сила затезања ужета, извршено је неколико тестова. Уже за електричну ограду је развучено од једног до другог вертикалног носећег стуба при чему је растојање између вертикалних стубова било 12 метара. Један крај ужета је фиксиран за један вертикални носећи стуб, док је на другом крају постављен мерни уређај. Овај мерни уређај је даље повезан са уређајем за затезање ужета који је монтиран на крају другог вертикалног стуба (слика 7.4). На половини растојања између вертикалних носећих стубова, иза развученог ужета, постављена је вертикална мерна скала на зид који се налази у позадини (слика 7.5).



Слика 7.4 Одређивање силе затезања ужета: 1 - вертикални носећи стуб, 2- уже, 3- мерна скала, 4 – мерни уређај, 5- уређај за затезање ужета



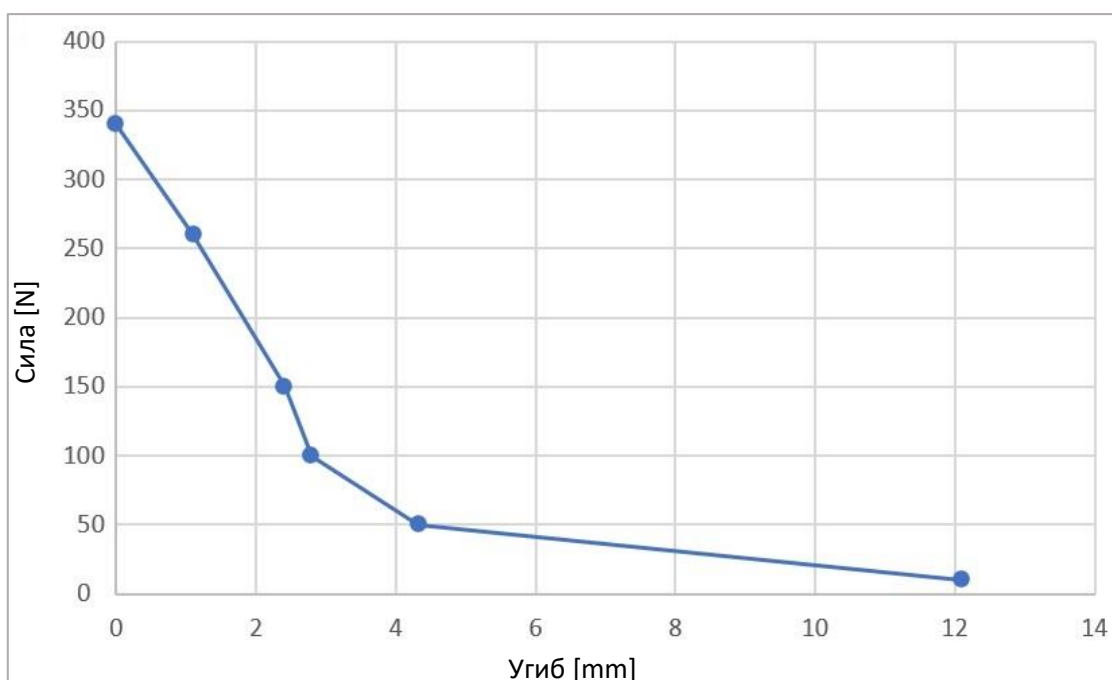
Слика 7.5 Уже и мерна скала

Након поставке, извршено је неколико тестова. У првом тесту, сила затезања је повећавана све до момента када није било угиба ужета у средини. На мерном уређају је очитана потребна сила од око 340 N како би се обезбедило да уже буде без угиба. Након првог теста извршено је још неколико испитивања са мањим силама затезања (табела 2) како би се утврдило угибање ужета наспрам силе затезања.

Табела 2 Параметри испитивања угиба ужета наспрам силе затезања

Тест бр.	Сила затезања [N]	Угиб [mm]
1.	340	0
2.	260	1,105
3.	150	2,405
4.	100	2,795
5.	50	4,325
6.	10	12,105

На слици 7.6 је приказан дијаграм сила - угиб који је креиран на основу резултата добијених током испитивања. Након разматрања добијених података, закључено је да потребна сила затезања ужета износи од 40 N до 100 N како би се остварио угиб ужета у опсегу од 2.5 mm до 5 mm.



Слика 7.6 Дијаграм сила – угиб

7.3 Испитивање механичких карактеристика ужета

У складу са функционалним захтевима који су дати у поглављу 4.2 за потребе експеримента и израду прототипа RoboShepherd система, за електричну ограду је изабрано уже Farmline Dragon (слика 7.7) са следећим карактеристикама:

- Вишеслојно уpletено уже које се састоји од пластичних нити и металних жица;
- Укупни пречник: $D = 3,8 \text{ mm}$;
- Проводне жице: $3 \times 0,2 \text{ mm} + 3 \times 0,25 \text{ mm}$;
- Декларисана сила кидања ужета 3000 N .

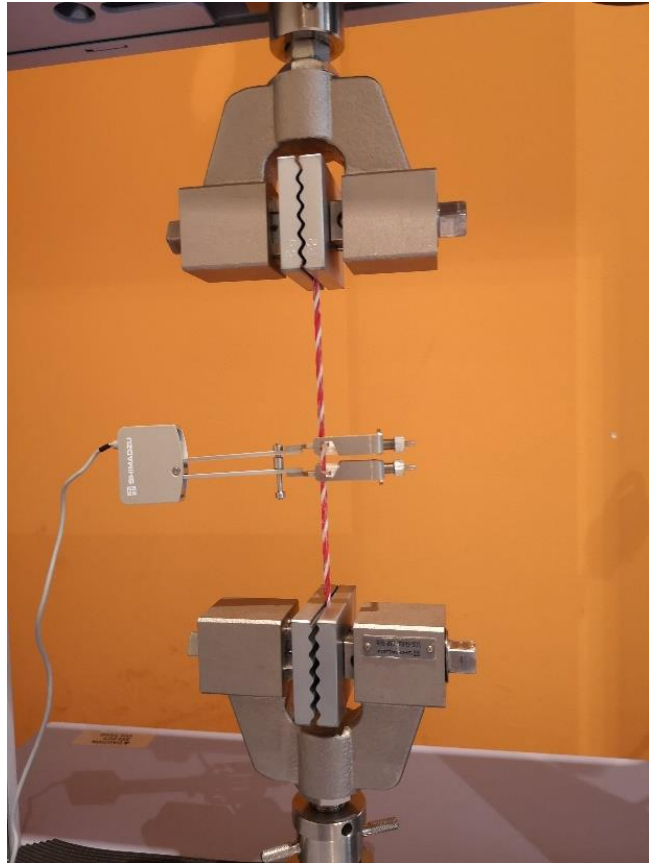


Слика 7.7 Уже за електричну ограду - Farmline Dragon

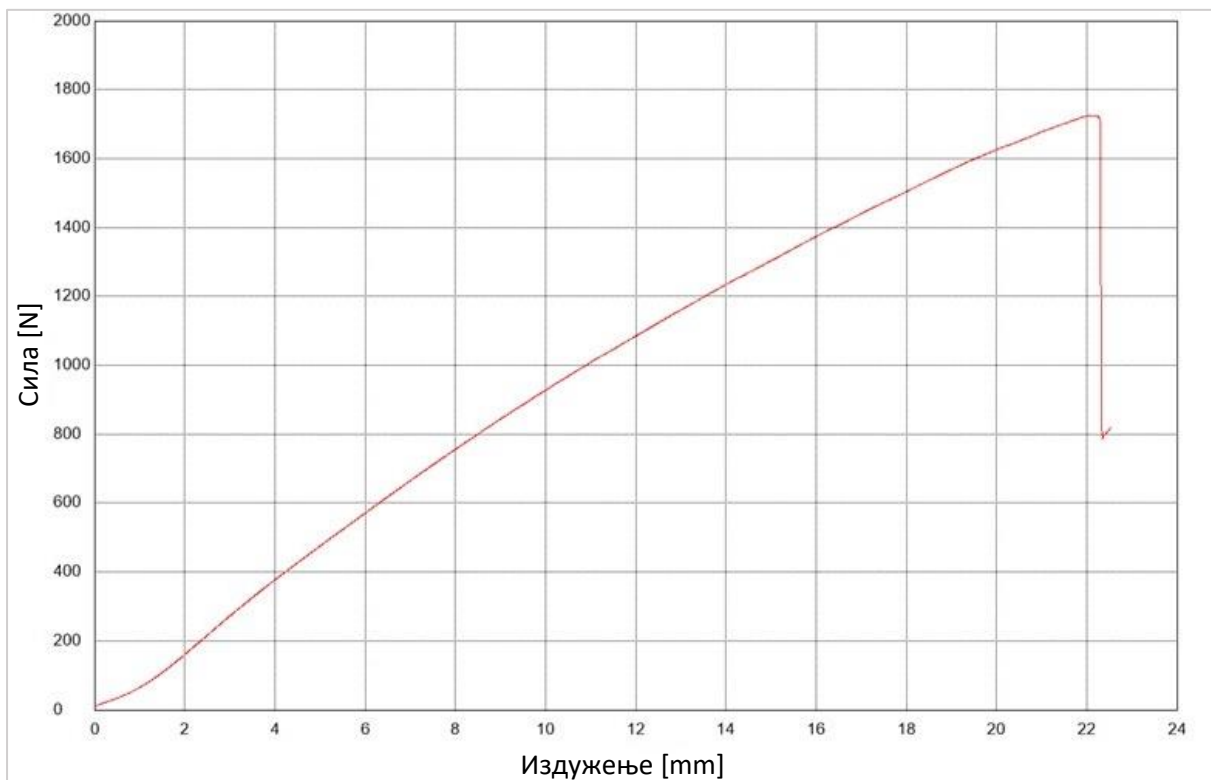
За изабрано уже, а у циљу утврђивања својстава током затезања, обављена су испитивања на SHIMADZU AGS 10kN универзалној машини за испитивање материјала затезањем. Испитивање је обављено коришћењем ручних чељусти са таласастим стезним површинама (слика 7.8), како би се обезбедило мање клизање узорака. Испитивања су обављена са или без тензометра, као што је приказано у табели 3.

Табела 3 Параметри испитивања ужета

Тест бр.	Слободна дужина узорка L_0 [mm]	Брзина радног хода [mm/min]	Тензометар (дужина узорка 10 mm)	Повратни ход	Пуцање ужета	Максимална сила [N]	Број циклуса
1.	150	10	Да	Не	Да	1724	1
2.	150	10	Не	Не	Да	1669	1
3.	150	10	Не	Да	Не	1000	1
4.	150	10	Да	Да	Не	1000	1
5.	150	10	Да	Да	Не	100	1
6.	150	10	Да	Да	Не	100	1000



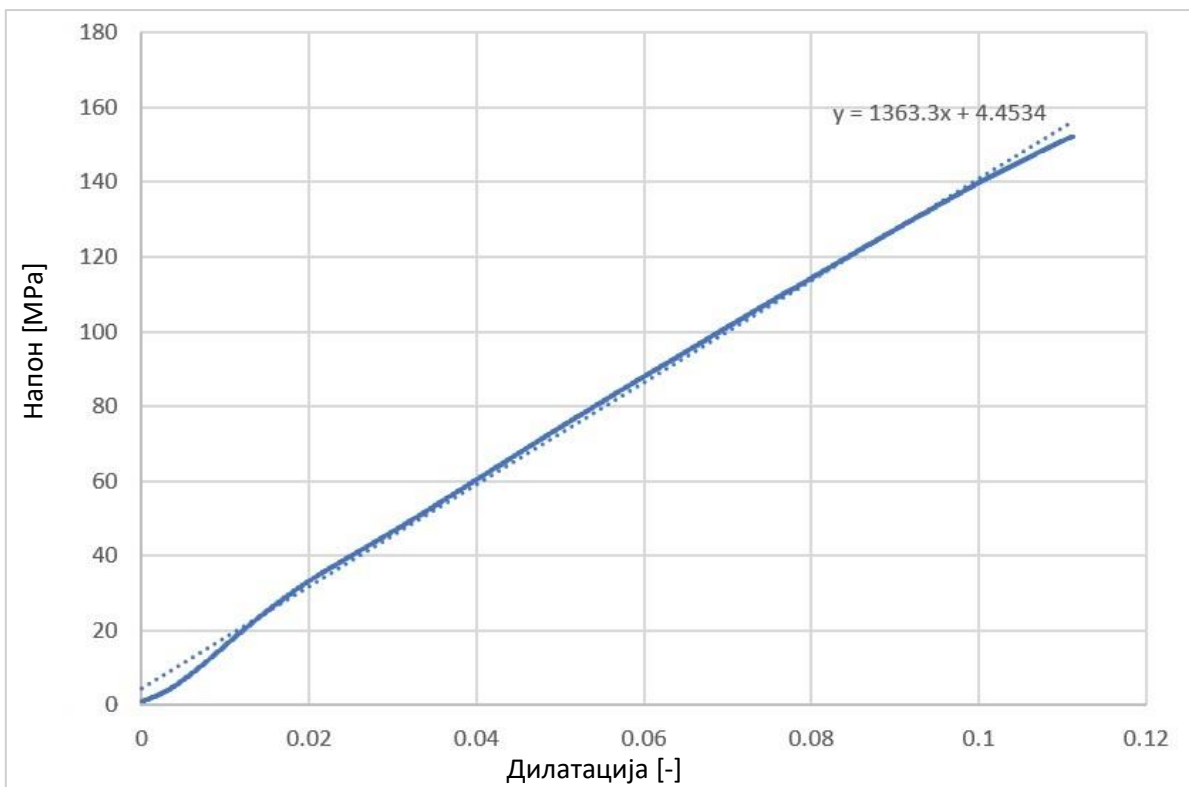
Слика 7.8 Почетак испитивања ужета са постављеним тензометром



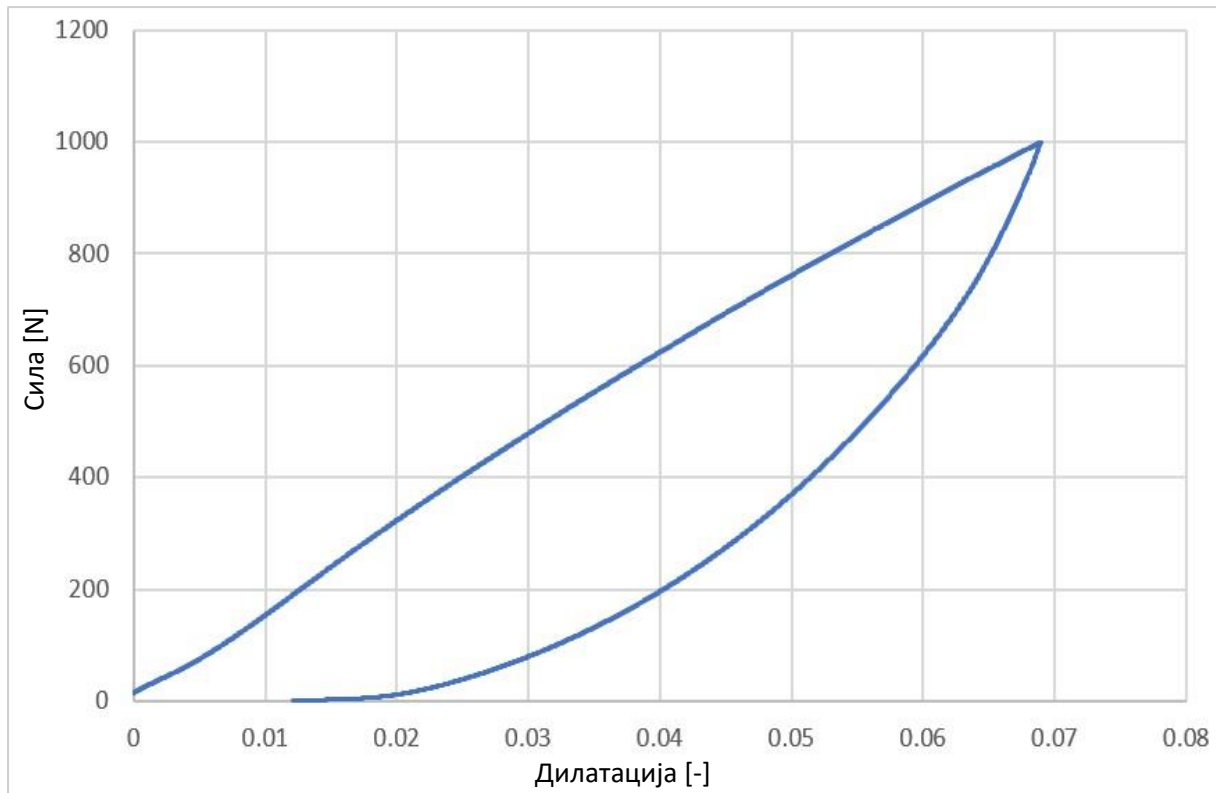
Слика 7.9 Тест бр. 1 - Дијаграм сила - издужење



Слика 7.10 Тест бр.1 - Уже након пуцања



Слика 7.11 Тест бр. 1 - Дијаграм напон – дилатација



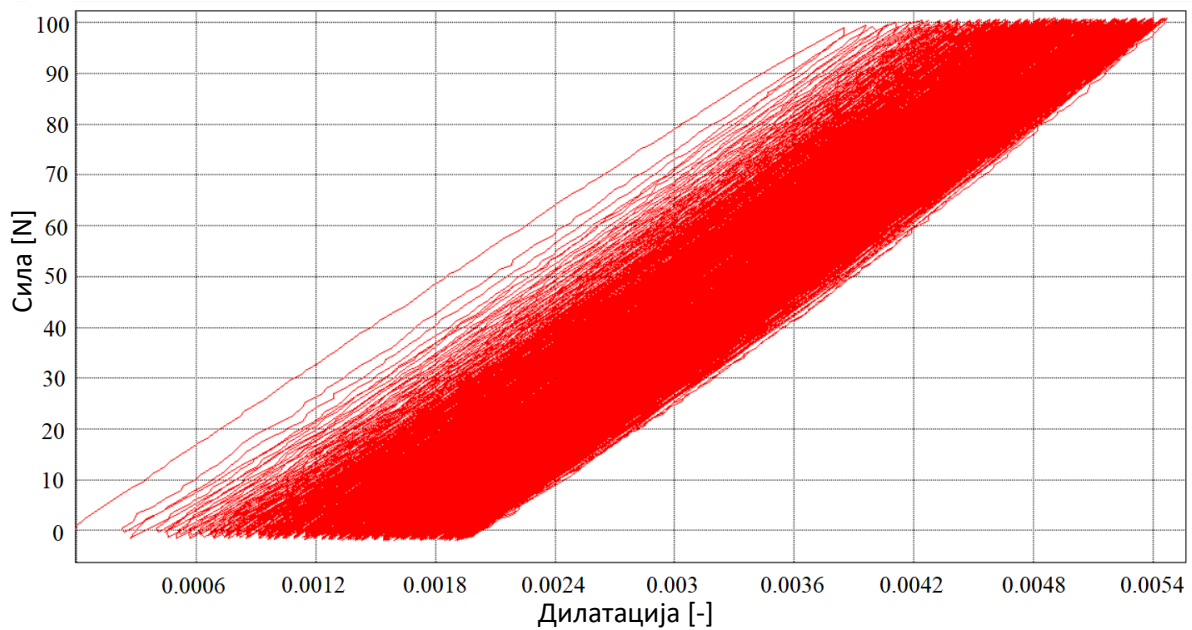
Слика 7.12 Тест бр. 4 - Дијаграм сила – дилатација

Резултати испитивања:

Након почетне поставке експеримента, извршено је неколико тестова који су имали за циљ да испитају својства ужета током затезања. На слици 7.9 је приказан дијаграм сила – издужење током теста број 1. На дијаграму се може видети да је до прекида ужета дошло на 1724 N, што је мање од декларисане вредности (3000 N) коју је дао произвођач. Установљено је да је до прекида дошло због контакта ужета са оштрим ивицама хватаљки, што је указало на то да се мора водити рачуна приликом монтирања ужета. Такође, на дијаграму се може видети да је издужење ужета при максималној сили затезања било око 22 mm. Издужење је добијено мерењем померања хватаљки, при чему је почетно растојање између хватаљки било 150 mm (слободна дужина узорка). На слици 7.10 је приказано уже након пуцања током теста број 1. На слици 7.11 је приказан дијаграм напон – дилатација током теста број 1. Дилатација је добијена коришћењем тензометра. На слици 7.12 је приказан дијаграм сила – дилатација током теста број 4. Током овог теста уже је затегнуто до силе од 1000 N, а након тога у повратном ходу је растерећивано брзином од 10 mm/s, при чему је примећена појава хистерезиса.

На слици 7.13 су приказани резултати добијени током испитивања замора ужета. Као и током претходних тестова, почетна слободна дужина узорка између хватаљки је

износила 150 mm, монтиран је тензометар дужине 10 mm, док је брзина радног хода била 10 mm/min. За разлику од претходних тестова, овде је сила којом је оптерећивано уже била доста мања и износила је 100 N, пошто је то максимална предвиђена сила до које би се уже затезало током коришћења система RoboShepherd. Тест је изведен тако што је уже затезано до 100 N и растерећивано, у 1000 циклуса. Са слике се може видети да трајна дилатација након 1000 циклуса износи нешто мање од 0.002, односно, када се прерачуна трајно издужење узорка дужине 150 mm би износило око 0.3 mm након 1000 циклуса.



Слика 7.13 Тест бр. 6 - Дијаграм сила - дилатација

На основу података добијених из спроведених тестова затезања закључено је да ће уже одговарати захтевима система Roboshepherd, односно може се користити за силе затезања које су добијене у испитивању изложеном у секцији 7.2.

7.4 Систем за аквизицију података

Термин „аквизиција података“ се обично односи на процес трансформације физичких феномена из реалног света у електричне сигнале који се мере и конвертују у дигиталне сигнале за даље потребе процесирања, анализе или меморисања од стране рачунара, при чему се могу прикупљати подаци са само једног сензора све до аквизиције са комплексних система [107]. Данас је развој технологије омогућио примену система за прикупљање и/или праћење података свуда где за то постоји потреба. Истраживачи, инжењери, лекари и други користе системе за аквизицију у различите сврхе. За правилно функционисање система у различитим условима и за адекватно реаговање и управљање потребно је извршити аквизицију података. У наставку је дат преглед неких развојних система који се користе за прикупљање података из окружења који утичу на пољопривреду, као и одређених технологија преноса података и типова мрежа и протокола који се могу применити на систем који је развијан у оквиру пројекта.

Аутори у раду [108] су представили принципе јефтиног интернет система за прикупљање података, са уграђеним уређајем за комуникацију преко GPRS протокола (*енгл. General Packet Radio Service*) који омогућава пренос података бежичним путем кроз мобилну мрежу. У раду [109] је предложен систем за прикупљање података базиран на ZigBee и Bluetooth мрежи који се може користити у фабрикама или индустрији као и за праћење животне средине. Предложени систем може да врши мерење одређених параметара као што су температура, влажност и ниво гасова присутних у атмосфери. У раду [110] је развијен систем за прикупљање података везаних за вибрације вратила у различитим осама, заснован на микроконтролеру. Аутори у раду [111] су развили систем за даљинско прикупљање улазно/излазних података који је заснован на ARM платформи (*енгл. Advanced Reduced Instruction Set Computer Machines*) за мерење електричних и термичких параметара као што су напон, струја, температура итд. Измерени подаци се могу приказати локално на монитору или се могу послати на систем за даљинско праћење. Систем за прикупљање података за анализу динамике возила заснован на GPS технологији презентован је у раду [112]. Развијени систем се састоји од GPS уређаја, преносног мини рачунара и софтвера. Измерени подаци као што су позиција, брзина и убрзање су сачувани и касније увезени у посебну апликацију за накнадну обраду. У раду [113] аутори су током експеримента користили систем за прикупљање података заснован на National Instruments 4472 Board хардверу и LabVIEW софтверу за одређивање силе затезања кабла.

Систем за праћење у реалном времену који се користи за логистику у сточарству приказан је у раду [114]. Развијени систем користи идентификацију путем радио фреквенције - RFID технологију (*енгл. Radio-frequency identification*) за праћење земље порекла стоке и за праћење околине током транспорта како би се осигурали адекватни услови за физичко стање стоке, док су аутори у раду [115] радили на истраживању везаном за интелигентну платформу за сточарство у облаку (*енгл. CLOUD*).

Економичан систем за прикупљање података заснован на Lab-VIEW софтверу за континуирано праћење и приказивање електричних параметара фотонапонског система представљен је у раду [116], док је у раду [117] истраживан бежични систем за мониторинг који користи Zigbee мрежу за онлајн праћење фотонапонског система који је повезан на електричну мрежу.

Развијен систем за прикупљање података за метеоролошке потребе заснован на микроконтролеру дат је раду [118]. Овај систем прикупља метеоролошке податке као што су температура и влажност које утичу на гајење пољопривредних усева на отвореном простору, док је у раду [119] сличан систем коришћен за праћење стања у стакленику.

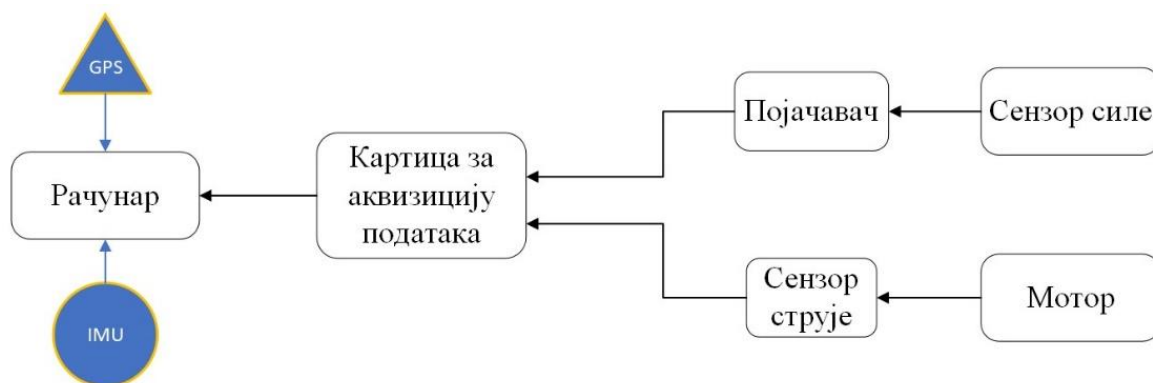
У раду [120] је приказан дизајн и имплементација бежичног система за аквизицију података за процену сунчеве енергије, који се састоји од сета сензора за мерење метеоролошких параметара. Аутори у раду [121] су предложили нови систем за прикупљање података са сензорима за примену код система везаних за соларну енергију. Предложени систем је погодан за велике и удаљене инсталације. Основна предност развијеног система је начин снимања података и једноставност промене врсте сензора. Аутори у раду [122] су развили рачунарски заснован систем за прикупљање података за системе обновљивих извора енергије за мерење и метеоролошких и електричних параметара система, док је у раду [123] представљен систем за прикупљање података за даљинско праћење и контролу постројења система обновљивих извора енергије (ОИЕ) базираних на клијент/сервер архитектури. Овај систем не захтева физичку везу надгледаних система са сервером за прикупљање података што је веома важно јер се постројења за ОИЕ најчешће постављају на неприступачним локацијама. Надгледани параметри овог система су доступни преко интернета. У раду [124] је описан преносиви систем за континуирано мерење који обезбеђује робусно и јефтино решење за праћење квалитета животне средине у затвореном простору. Предложени систем се састоји од различитих сензора за мерење квалитета животне средине у затвореном простору - температура, релативна влажност, осветљеност, CO₂, PM_{2.5} итд.

Аутори у раду [125] су приказали системе за праћење и прикупљање података који се користе у болницама, посебно у јединицама интензивне неге. Приказани системи се користе за прикупљање, управљање и праћење података који се односе на здравље пацијента. Систем са више сензора за прикупљање података из ципеле пацијента представљен је у раду [126]. Систем је првенствено намењен пацијентима који болују од дијабетеса и периферне неуропатије, а који су подложни непримећеној трауми на стопалу која може да изазове оштећење коже. Развијени систем може да прикупља податке о температури, притиску и влажности у ципели који се касније могу користити за анализу. У раду [127] аутори су представили 96-канални имплантабилни неуронски систем за прикупљање података који може да врши детекцију и екстракцију из неуронских таласа и бежично преноси податке на спољну јединицу.

У наставку рада ће бити изложен хардвер и софтвер система за аквизицију података који је развијен за потребе система RoboShepherd. Систем за аквизицију је развијен у циљу прикупљања и праћења неколико параметара који су неопходни за правилан рад подсистема за затезања ужета.

7.4.1 Систем за аквизицију података за подсистем за затезање ужета

У циљу прикупљања и праћења више параметара потребних за исправан рад подсистема за затезања ужета, развијен је систем за аквизицију података. Развијени систем прикупља податке са различитих сензора, обрађује их и шаље управљачком систему током коришћења система RoboShepherd. Три роботске јединице су опремљене локалним, док је четврта роботска јединица имала глобални систем за аквизицију података. Блок дијаграм локалног система за аквизицију података за подсистем за затезање ужета приказан је на слици 7.14.

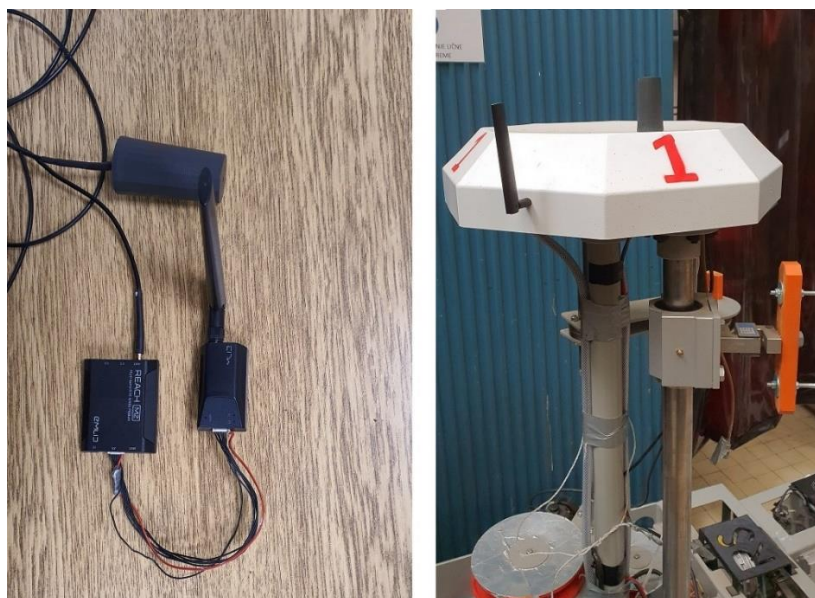


Слика 7.14 Блок дијаграм локалног система за аквизицију података

Локални систем за прикупљање података састоји се од:

- Рачунара са бежичном мрежном картицом;
- GPS модула;
- Картице за аквизицију података;
- Сензора силе са појачавачем;
- Инерцијалног сензора IMU (*енгл. Inertial Measurement Unit*) и
- Сензора струје.

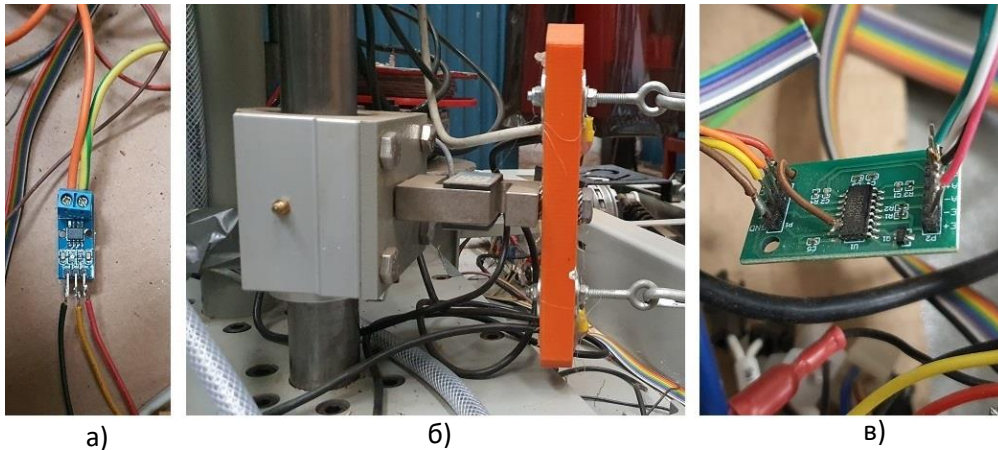
Због потенцијално тешких радних услова (ниска/висока температура, могући удари итд.) коришћен је рачунар индустријске намене. На рачунару је инсталиран одговарајући софтвер. Сви рачунари су опремљени бежичним мрежним картицама како би могли да комуницирају међусобно. За одређивање положаја роботске јединице коришћен је GPS модул са кинематским позиционирањем у реалном времену RTK (*енгл. Real Time Kinematics*) уз додати радио за комуникацију великог домета LoRa (*енгл. Long Range Radio*). Да би се одредио положај роботске јединице са прецизношћу од 1 cm, коришћен је EMLID GPS Reach M2 модул са подацима за корекцију које је добијао преко LoRa-е. GPS модул је директно повезан са рачунаром путем кабла, док су GPS и LoRa антене инсталиране на куполи роботске јединице (слика 7.15) и повезане са GPS модулом.



Слика 7.15 GPS модул са антенама монтиран на роботској јединици

Као картица за аквизицију података коришћена је Arduino Mega 2560 микроконтролерска плоча са 54 дигитална улазно/излазна пина и 16 аналогних улаза која је директно повезана са рачунаром путем кабла. За мерење силе затезања у ужади

коришћен је индустријски сензор силе до 200 kg. Овај сензор је повезан са појачавачем, који је даље повезан са Arduino плочом. За мерење струје мотора коришћен је сензор струје од 30 А. Једна страна сензора је повезана са жицом мотора, док је друга страна повезана са Arduino плочом. Сензор струје, сензор силе и појачавач су дати на слици 7.16.



Слика 7.16 Сензори - а) Сензор струје, б) Сензор силе, в) Појачавач за сензор силе

За одређивање нагиба роботске јединице, а самим тим и вертикалног носећег стуба коришћен је инерцијални сензор Lord 3DMGX5-IMU. Сензор поседује калибрисан и температурно компензован троосни акцелерометар и жироскоп како би се постигло прецизно мерење у свим динамичким условима. Сензор је монтиран на средини роботске јединице (слика 7.17) и директно спојен на рачунар преко кабла.



Слика 7.17 Инерцијална мерна јединица монтирана на средини роботске јединице

Пошто су роботске јединице серијски повезане, то значи да сензор силе на једној роботској јединици мери силу затезања у ужади коју ствара подсистем за затезање ужета који је монтиран на другој роботској јединици. Због тога се током процеса затезања ужета, локално измерена вредност силе бежично шаље у управљачки подсистем за затезање ужета на другој роботској јединици.

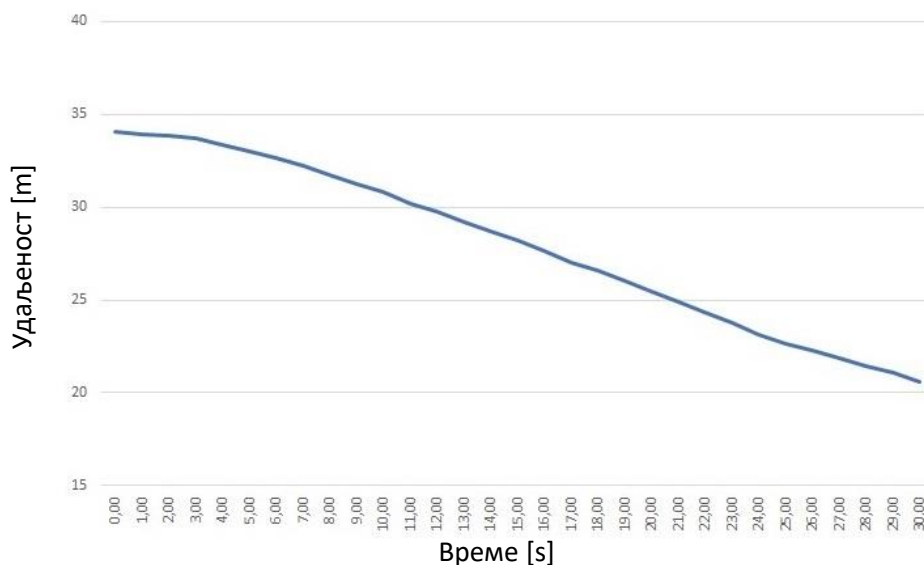


Слика 7.18 Графичко корисничко окружење за систем за аквизицију података

Глобални систем за аквизицију података је исти као локални системи за аквизицију са могућношћу да прима GPS податке о положају из других локалних система за аквизицију. Глобални систем за аквизицију података је инсталиран само на једној роботској јединици, при чему се GPS подаци о положају других роботских јединица шаљу преко бежичне мреже до њега. Сви прикупљени подаци се даље користе за израчунавање растојања између роботских јединица током управљања подсистемом за затезање ужета. Софтвер за системе за аквизицију података (слика 7.18) је развијен у програмском окружењу LabVIEW.

7.4.2 Тестирање система за аквизицију података за подсистем за затезање ужета

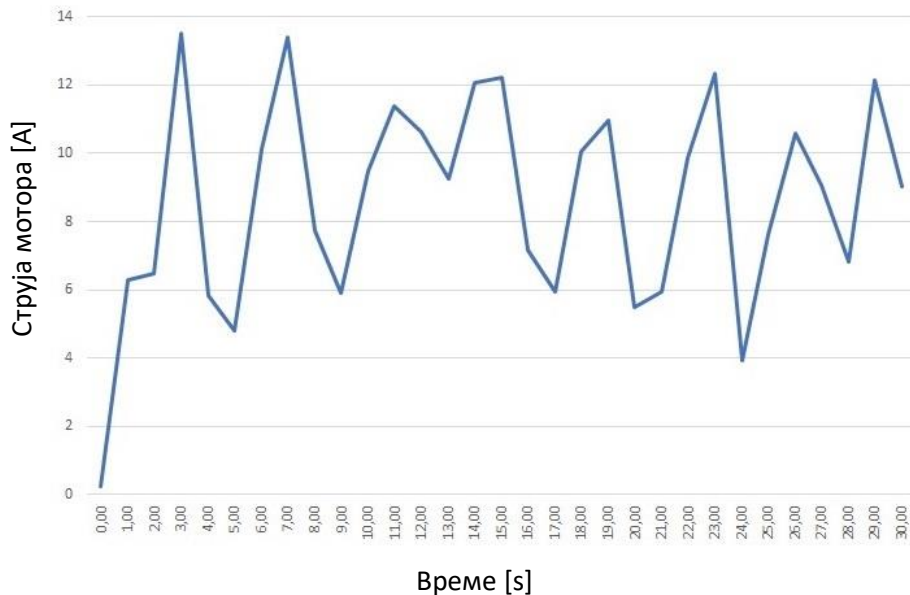
Развијени систем за аквизицију података тестиран је на фарми у близини града Ниша, Србија. Циљ теренског испитивања био је прикупљање података који су важни за управљање подсистемом за затезања ужета. За ту сврху снимани су подаци током тестирања целог система на изабраној локацији. У наставку рада су приказани резултати који су добијени током једног од тестова који се односе на две предње роботске јединице које су повезане једним паром ужаци. У овом тесту почетна удаљеност између роботских јединица је била око 34 м. Затим је спроведен сценарио у коме се једна од роботских јединица кретала право, док се друга кретала праволинијски и истовремено се приближавала првој у временском оквиру од 30 секунди. Помоћу већ поменутих сензора мерена је сила у пару ужаци, струја мотора који је коришћен за затезање ужаци и положај обе роботске јединице. За израчунавање удаљености између роботских јединица коришћена је Haversine формула [128]. Ова формула се користи за одређивање најкраће праволинијске удаљености између две одређене локације, на основу података о географској ширини и дужини са GPS модула са обе роботске јединице. Добијени подаци су приказани на сликама 7.19-7.21.



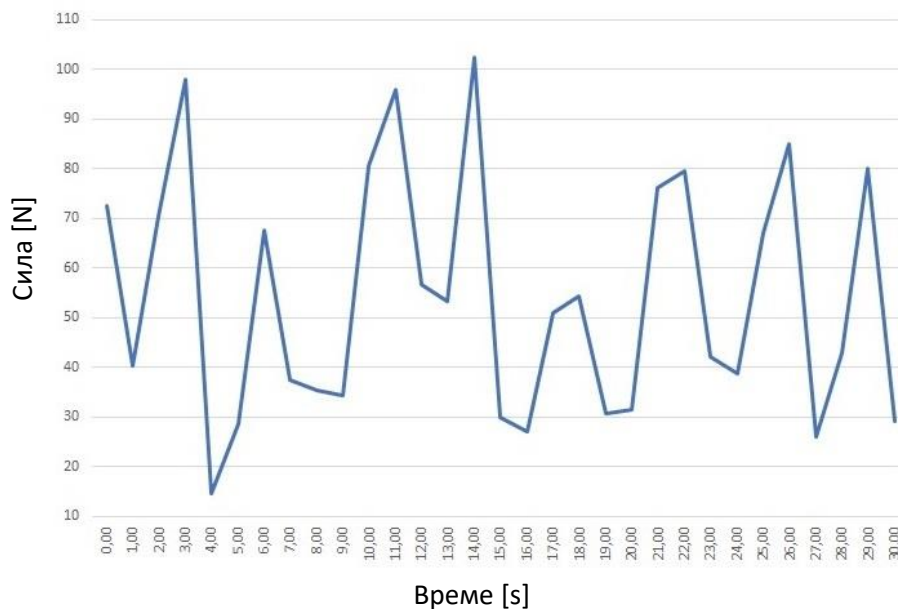
Слика 7.19 Промена удаљености између роботских јединица

На слици 7.19 је приказана промена удаљености између роботских јединица током теста. Почетна удаљеност између роботских јединица пала је са почетних 34 m на 20 m услед приближавања једне роботске јединице другој. На слици 7.20 се може приметити да је најнижа струја мотора била 0 А, што је у корелацији са тренутком пре

покретања подсистема за затезања ужета, а затим је била у опсегу између 4 А и 14 А током затезања ужади. Из дијаграма на слици 7.21 може се закључити да је сила у ужади била око 70 N на почетку теста. Ово се догодило због ручног пренапрезања ужади током повезивања роботских јединица. У наставку, сила затезања опада и расте током кретања роботских јединица.



Слика 7.20 Промена струје мотора током затезања ужади



Слика 7.21 Промена силе у пару ужади током теста

8. Валидација структурних компоненти и прорачун превртања роботске јединице

8.1 Валидација структурних компоненти

У циљу валидације склопова, подсклопова и компоненти пројектованих за систем RoboShepherd, извршена је анализа методом коначних елемената (МКЕ) у софтверу ANSYS Workbench 19.2. Анализа је извршена у фази пројектовања виталних компоненти роботских јединица за очекивана оптерећења током употребе целог система. За ове потребе су урађене следеће анализе:

- статичка структурална анализа подскопа вертикалног носећег стуба при радним оптерећењима,
- фреквентна анализа подскопа вертикалног носећег стуба,
- статичка структурална анализа подскопа вертикалног носећег стуба при повећаном инерцијалном оптерећењу.

За извођење наведених анализа прво је припремљен МКЕ модел подскопа вертикалног носећег стуба. У циљу припреме наведеног МКЕ модела, унутрашње компоненте као што су електронске компоненте, каблови и сензори су уклоњени из геометријског модела јер нису били предмет анализе. Купола је такође уклоњена из анализе пошто је њена примарна функција заштита електронских компоненти од утицаја околине, а њен допринос крутости конструкције је занемарљив. Геометријски модел редуктора и мотора за затезање ужета је такође поједностављен јер наведене компоненте не доприносе крутости конструкције. Вијци, навртке и подлошке су такође уклоњени из анализе како би се смањили рачунски захтеви и добили резултати у разумном времену без значајног губитка тачности.

Упрошћени геометријски модел подскопа вертикалног носећег стуба је трансформисан у дискретизовани модел коначних елемената применом напредних алата за умрежавање. Дискретизовани модел се састојао од 415822 чвора који су формирали 96729 коначних елемената. Упрошћени и дискретизовани модел редизајнираног подскопа вертикалног носећег стуба су приказани на слици 8.1.

Материјали су додељени компонентама модела према пројектној документацији. Својства материјала су преузета из базе података материјала која је део софтверског

пакета. За компоненте вертикалног носећег стуба (поглавље 6.2) су коришћени следећи материјали:

- Легура алуминијума високе чврстоће за доњу, средњу и горњу плочу;
- PLA (енгл. *Polylactic acid*) пластика за котурове;
- Челик S355J2GR за остале компоненте.

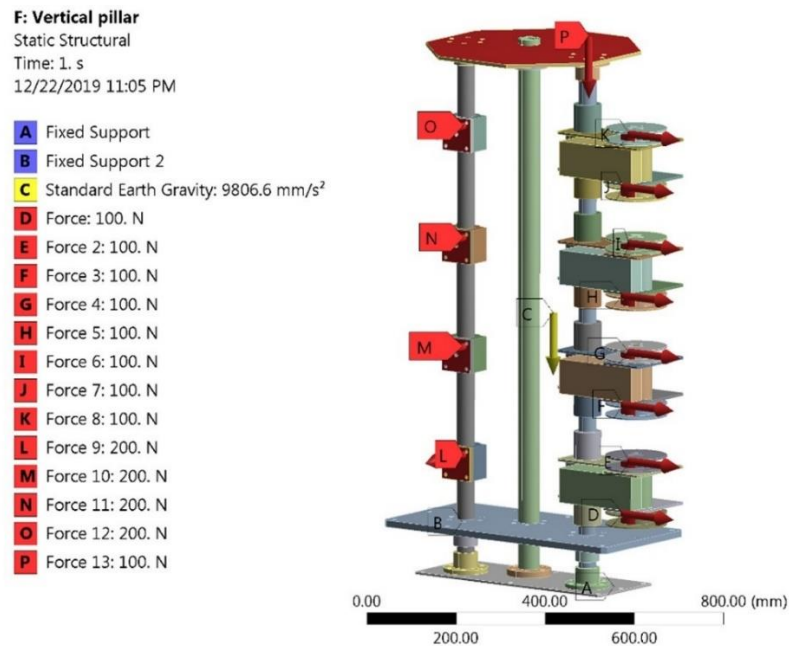


Слика 8.1 Упрошћени и дискретизовани геометријски модел вертикалног носећег стуба

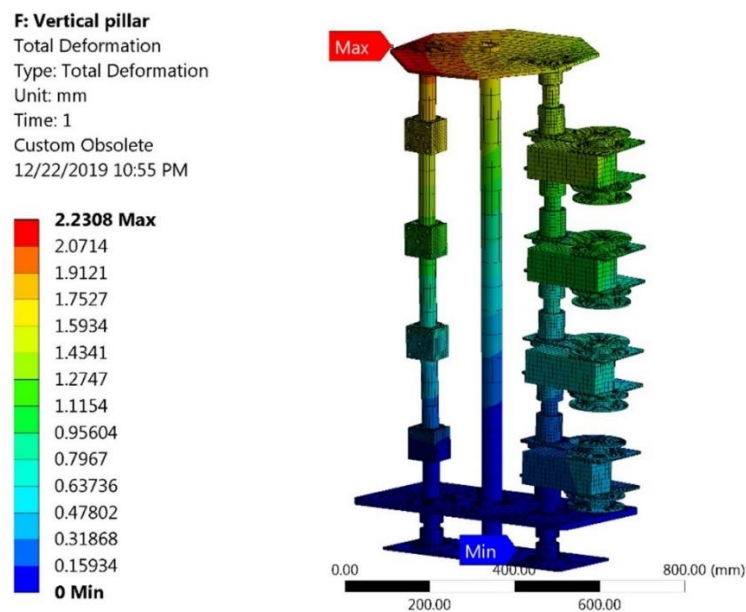
Спојеве између делова подскопа вертикалног носећег стуба се третирају као „залепљени“ (енгл. *Bonded*) пошто се у реалности спајају завртањским везама или поступком заваривања што одговара наведеном контактном стању. Крутост контакта је ажурирана у свакој итерацији симулације, а контакти су дефинисани методом ограничења (енгл. *Pure penalty method*). Сви контакти су третирани као асиметрични да би се избегле грешке у дефинисању типа контактних површина.

Као што је већ напоменуто, прва извршена анализа била је статичка структурна анализа подскопа вертикалног носећег стуба при радним оптерећењима у циљу утврђивања напонско - деформационог стања и деформација под радним оптерећењима. Оптерећења и гранични услови за статичку структурну анализу дати су на слици 8.2. Анализом радних оптерећења вертикалног носећег стуба, може се уочити да је подскоп вертикалног носећег стуба изложен следећим оптерећењима:

- оптерећење услед силе гравитације (C),
- сила затезања од 100 N која делује на котурове (D, E, F, G, H, I, J, K),
- сила затезања од 200 N која настаје од затезања ужади са друге роботске јединице (L, M, N, O),
- сила од 100 N која замењује тежину куполе и електричних компоненти у куполи (P).

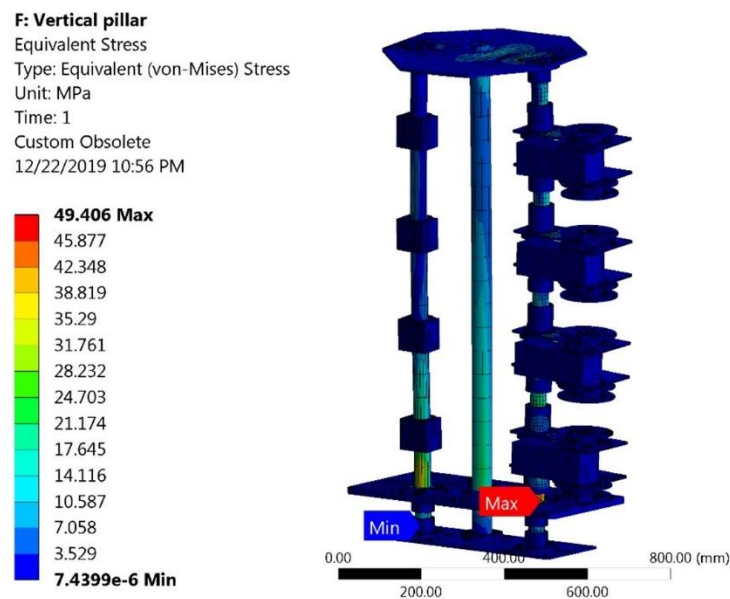


Слика 8.2 Задата оптерећења на вертикалном носећем стубу

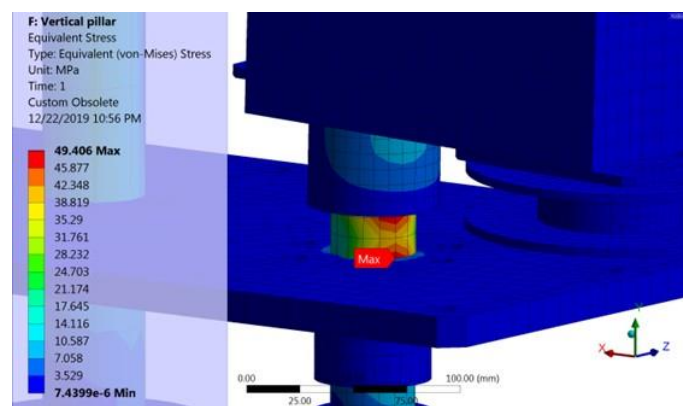


Слика 8.3 Деформација вертикалног носећег стуба

Оптерећења су дефинисана за конфигурацију са максималним бројем подсистема за затезање ужета, односно 8 котура са по једним ужетом са оптерећењем од 100 N. У складу са тим, сила на сваком сензору силе је постављена да буде по 200 N. Силе затезања ужади су узете за положај роботских јединица када је формирана електрична ограда под углом од 90° између три јединице. На слици 8.3 се може видети да се вертикални носећи стуб након оптерећења деформише за највише 2.23 mm што је задовољавајуће са становишта структурног интегритета целог подскопа.



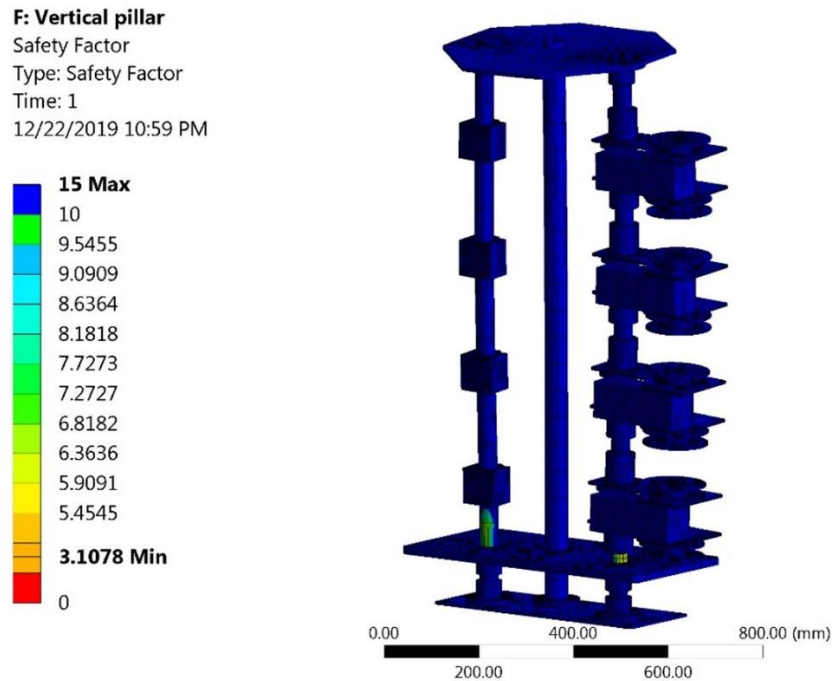
Слика 8.4 Напонско стање вертикалног носећег стуба при радном оптерећењу



Слика 8.5 Максимални напон на вертикалној вођици

На слици 8.4 је приказано напрезање вертикалног носећег стуба. Максимални напон износи око 50 MPa што је знатно испод дозвољеног напона за челик S355J2GR (355 MPa). Максимални напон настаје у контакту између вертикалне вођице и плоче услед савијања вертикалне вођице (слика 8.5).

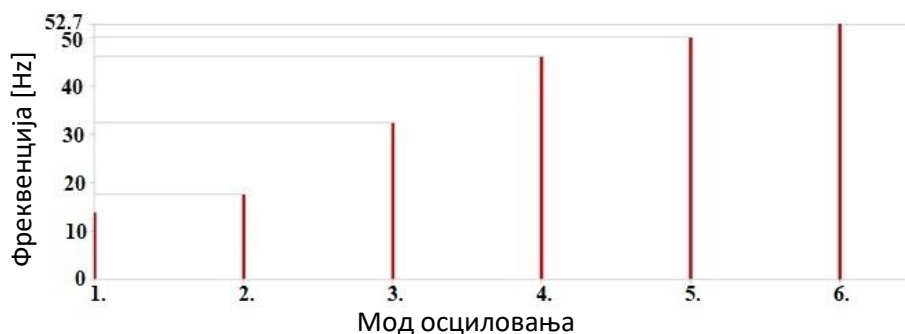
На слици 8.6 је приказана расподела степена сигурности. Минимални степен сигурности је 3.1 што је изнад дозвољеног степена сигурности за овакав тип конструкције [129].



Слика 8.6 Степен сигурности

На основу изведене статичке анализе пројектоване конструкције може се закључити да подсклоп вертикалног носећег стуба има задовољавајућу крутост и да су под радним оптерећењем напони и деформације знатно испод дозвољених.

Друга извршена анализа била је фреквентна анализа деформисаног облика подскопа вертикалног носећег стуба. Фреквентна анализа је извршена у опсегу између 0 и 200 Hz. На слици 8.7 су приказане природне фреквенције подскопа вертикалног носећег стуба.

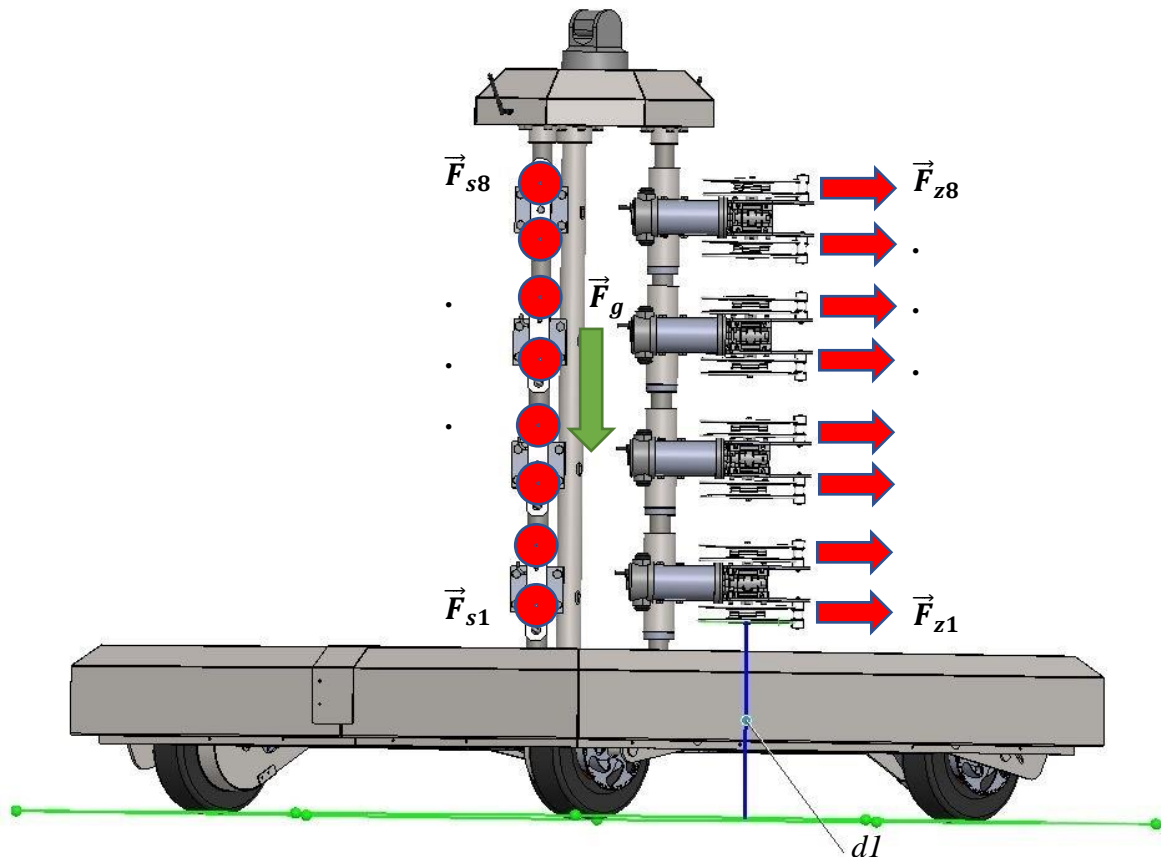


Слика 8.7 Природне фреквенције подскопа вертикалног носећег стуба одређене фреквентном анализом у оптерећеном стању

На слици 8.7 се може видети да постоји неколико природних фреквенција око 50 Hz што је максимална брзина мотора који се користи код подсистема за затезање ужета. Како би се избегла резонанција, препоручљиво је прилагодити брзину мотора у опсегу између 2500 и 2800 RPM.

8.2 Прорачун превртања роботске јединице

Како би се спречило превртање роботских јединица услед силе затезања ужета урађен је прорачун момента за више случајева који могу да се десе током коришћена RoboShepherd система. За све случајеве је рачуната најнеповољнија конфигурација, односно сматрано је да сила затезања износи 100 N по ужету односно на роботским јединицама су монтирана по 4 подсистема за затезање ужета (слика 8.8).



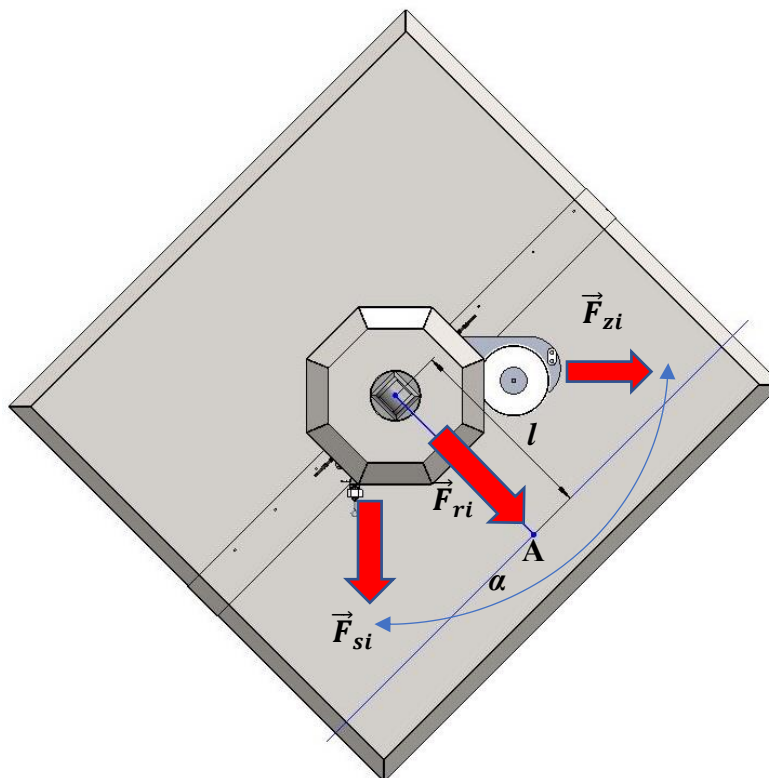
Слика 8.8 Оптерећења услед сила затезања ужади

Први случај који је разматран је ситуација када је електрична ограда RoboShepherd система формирана у облику правоугаоника (слика 8.9), односно угао између подскопа уређаја за затезање ужета и подскопа сензора силе је $\alpha = 90^0$ (слика 8.10), при чему је свака роботска јединица заправо теме правоугаоника. Ужад су

постављена на 8 нивоа тако да на сваку роботску јединицу делују силе \vec{F}_{si} са стране подскопа сензора силе, силе \vec{F}_{zi} , $i = 1, 2, \dots, 8$ са стране подскопа уређаја за затезање ужета и сила \vec{F}_g услед гравитације. Први ниво је на растојању које износи $d_1 = 400$ mm од подлоге. Сваки следећи ниво је за по 110 mm изнад претходног све до задњег нивоа на ком висина ужета износи $d_8 = 1170$ mm.

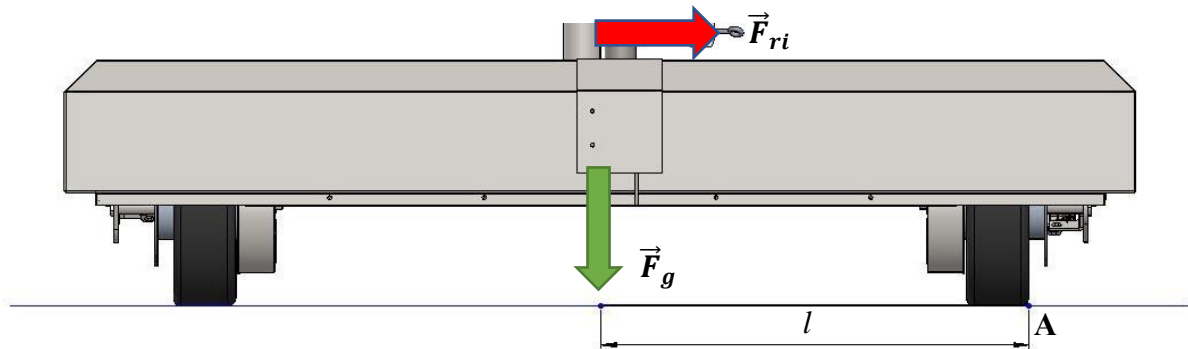


Слика 8.9 Правоугаони облик RoboShepherd система



Слика 8.10 Положај ужади под углом $\alpha = 90^\circ$ (поглед одозго на роботску јединицу)

Сила \vec{F}_r је резултујућа сила на сваком нивоу која настаје услед сила \vec{F}_s и \vec{F}_z . Пошто подсклоп уређаја за затезање ужета и подсклоп сензора силе могу да ротирају око вођица, то доводи то тога да правац резултујуће силе \vec{F}_r зависи од позиције ових подсклопова. За потребе прорачуна је усвојено да оса која пролази кроз тачку **A** (слика 8.11) буде на најкраћем могућем растојању које износи $l = 500 \text{ mm}$, а око које би роботска јединица потенцијално могла да се преврне.



Слика 8.11 Дејство сила на роботску јединицу (поглед спреда)

Случај 1:

$$F_{si} = 100 \text{ N},$$

$$F_{zi} = 100 \text{ N},$$

$$\alpha = 90^\circ,$$

$$l = 0.5 \text{ m},$$

$$F_{ri} = \sqrt{F_{si}^2 + F_{zi}^2 + 2F_{si}F_{zi} \cos \alpha}, \quad \Rightarrow F_{ri} = 141.4 \text{ N} \quad (1)$$

Момент превртања за тачку **A** износи:

$$\sum M_A = \sum_{i=1}^8 F_{ri} d_i = 141.4 \text{ N} * 6.28 \text{ m} = 888 \text{ Nm} \quad (2)$$

Потребан момент како би се спречило превртање роботске јединице износи:

$$M_A = F_g l \quad (3)$$

Одавде се може израчунати минимална потребна маса роботске јединице како би се спречило превртање када је угао $\alpha = 90^\circ$:

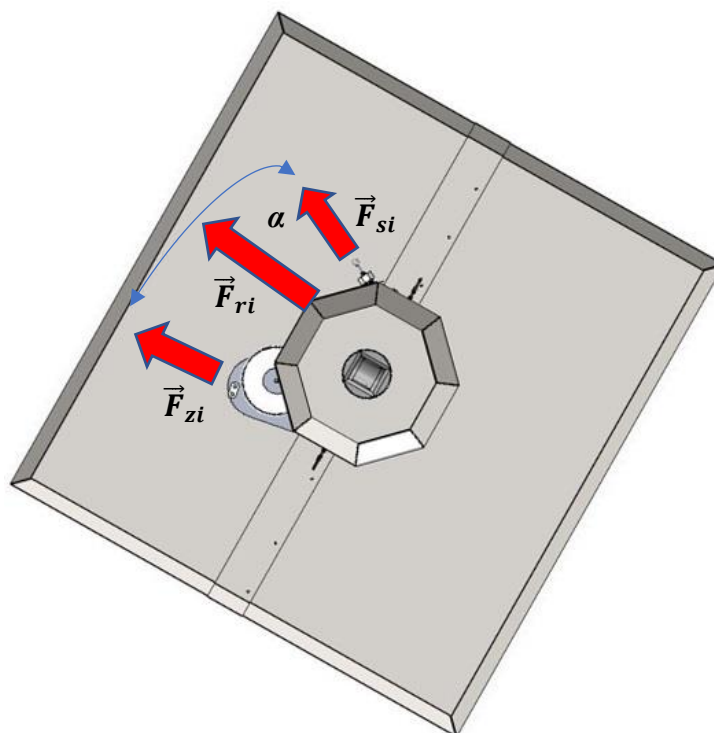
$$m_{rj} = \frac{M_A}{gl} = \frac{888}{9.81 * 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 181 \text{ kg} \quad (4)$$

Други случај који је разматран је ситуација када роботске јединице формирају оштар угао (слика 8.12), односно угао између подсклопа уређаја за затезање ужета и подсклопа сензора силе је $\alpha < 90^\circ$ (слика 8.13). Експерименталним испитивањима је

утврђено да се угао α у одређеним конфигурацијама може драстично смањити. Како опадање угла α утиче на повећање резултујуће силе \vec{F}_r , прорачун у овом случају је урађен за најнеповољнију конфигурацију када угао α износи 35° .



Слика 8.12 Формација са оштрим углом између роботских јединица



Слика 8.13 Положај ужади под углом $\alpha < 90^\circ$ (поглед одозго на роботску јединицу)

Случај 2:

$$F_{si} = 100 \text{ N},$$

$$F_{zi} = 100 \text{ N},$$

$$\alpha = 35^\circ,$$

$$l = 0.5 \text{ m},$$

$$F_{ri} = \sqrt{F_{si}^2 + F_{zi}^2 + 2F_{si}F_{zi} \cos \alpha}, \quad \Rightarrow F_{ri} = 190.74 \text{ N} \quad (5)$$

Момент превртања за тачку А износи:

$$\sum M_A = \sum_{i=1}^8 F_{ri} d_i = 190.74 \text{ N} * 6.28 \text{ m} = 1193.45 \text{ Nm} \quad (6)$$

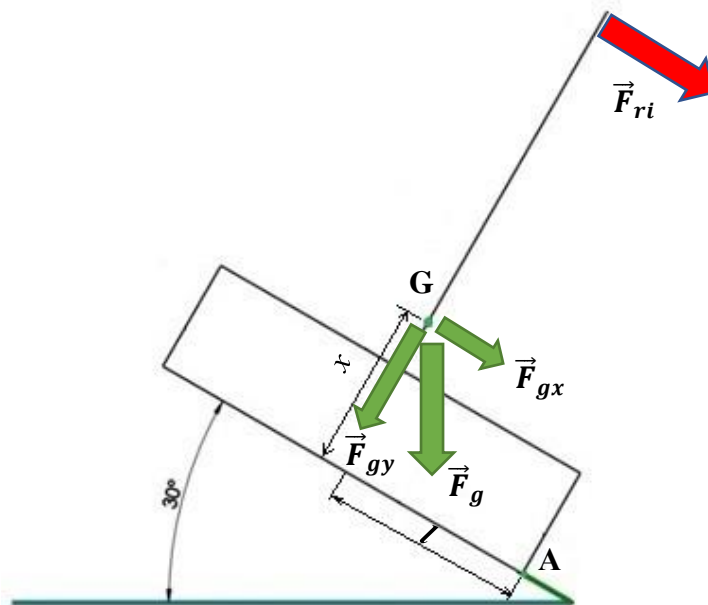
Потребан момент како би се спречило превртање роботске јединице износи:

$$M_A = F_g l \quad (7)$$

Одавде се може израчунати минимална потребна маса роботске јединице како би се спречило превртање када је угао $\alpha = 35^\circ$:

$$m_{rj} = \frac{M_A}{gl} = \frac{1193.45 \text{ Nm}}{9.81 * 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{m}} = 243.31 \text{ kg} \quad (8)$$

Трећи случај који је разматран сличан је другом с тим да је претпостављено да се једна роботска јединица налази на терену под нагибом од 30° . На слици 8.14 је дат упрошћени приказ роботске јединице и дејства сила. За прорачун је узет најнеповољнији случај где је и вертикални стуб под нагибом од 30° , а резултујуће силе \vec{F}_r делују под углом од 90° на вертикални стуб. Растојање x центра масе G роботске јединице, као и маса m_{rj} роботске јединице су одређени коришћењем софтверског пакета SOLIDWORKS у коме је рађено пројектовање и моделирање самог система.



Слика 8.14 Дејство сила када је роботска јединица на терену под нагибом

Случај 3:

$$F_{si} = 100 \text{ N},$$

$$F_{zi} = 100 \text{ N},$$

$$\alpha = 35^\circ,$$

$$l = 0.5 \text{ m},$$

$$x = 382 \text{ mm},$$

$$m_{rj} = 300 \text{ kg},$$

$$F_{ri} = \sqrt{F_{si}^2 + F_{zi}^2 + 2F_{si}F_{zi} \cos \alpha}, \quad \Rightarrow F_{ri} = 190.74 \text{ N} \quad (9)$$

Момент превртања за тачку А износи:

$$\sum M_A = \sum_{i=1}^8 F_{ri} d_i + F_{gx} x = 1193.45 \text{ Nm} + m_{rj} g \sin 30^\circ x = 1755.56 \text{ Nm} \quad (10)$$

Момент који спречава превртање роботске јединице износи:

$$M_A = F_{gy} l = m_{rj} g \cos 30^\circ l = 1274.35 \text{ Nm} \quad (11)$$

Према добијеним резултатима везаним за случај 1 и случај 2, силе затезања ужади неће довести до превртања роботских јединица у односу на облик електричне ограде који су формирале. Случај 3 је критичан, пошто иако у пракси тешко остварив, може довести до превртања роботских јединица. У том случају, као могуће решење за безбедан рад целог система, потребно је смањити силу затезања у ужади, или смањити број ужади електричне ограде или променити облик електричне ограде који формирају роботске јединице.

9. Интелигентно управљање подсистемом везе роботских јединица

RoboShepherd је пројектован као самоходни систем за испашу у виду роботског роја који има функцију покретне полигоналне електричне ограде која окружује сточне животиње у пољу или их приморава да се крећу дуж унапред дефинисане путање. Систем је пројектован тако да омогући извођење и враћање стада са испаше уместо пастира. У оквиру овог доктората је разматран систем који се састоји од четири роботске јединице, односно четири покретна стуба који су физички повезани. Физичка веза је остварена вишеслојним уплетеним ужетом које се састоји од пластичних нити и металних жица постављених на више различитих висина, а кроз које се пушта импулсна струја и на тај начин формира електрична ограда. Успостављањем везе на овакав начин, добија се систем физички повезаних роботских јединица чијим кретањем треба формацијски управљати. Због овакве структуре система, управљање кретањем и подсистемом физичке везе између робота је комплексан задатак. У зависности од захтеване формације система, роботске јединице могу да имају различите путање кретања као и различите брзине кретања. Такође, у зависности од захтеване формације система може се десити да једна или више роботских јединица стоје док се друге крећу или их заобилазе. Пошто се током кретања система роботске јединице крећу по неравном терену, могу да наиђу на терен под нагибом или се може десити да нека од роботских јединица буде на различитој висини у односу на друге. Због свега наведеног и због постојања физичке везе између роботских јединица, кретање сваке роботске јединице утиче на цео систем. Због тога је механички систем везе пројектован да буде прилагодљив у смислу да може да одговори на различите захтеве приликом промена положаја роботских јединица. Такође, управљање кретањем целог система умногоме зависи од управљања физичком везом између роботских јединица, којом се управља преко подсистема за затезање ужета. Због свега наведеног, управљање подсистемом за затезање ужета треба да омогући формацијско управљање кретања роботских јединица у реалном времену кроз исправан рад подсистема за затезање ужета.

9.1 Пројектовање система управљања подсистема везе

Управљање подсистемом за затезање ужета је засновано на принципу повратне спреге. Користећи систем за аквизицију података (поглавље 7.4) добијају се вредности силе у ужету, након чега се добијена вредност пореди са задатом вредношћу. Разлика између задате и тренутне вредности силе у ужету одређује грешку. Ова грешка се шаље PI контролеру. На основу ове грешке контролер генерише PWM сигнал (*енгл. Pulse Width Modulation*) за контролу напона мотора и на тај начин контролише брзину мотора. Окретањем мотора окрећу се котурови што доводи до затезања или опуштања ужади. Након тога, сила у ужади се поново мери уз помоћ сензора силе и пореди са задатом вредношћу (слика 9.1).



Слика 9.1 Блок дијаграм управљања подсистема за затезање ужета

Да би се тестирао развијено управљање за подсистем за затезање ужета изведено је више експерименталних испитивања. Почетна испитивања су обухватала лабораторијска испитивања и праћење рада само развијеног подсистема за затезање ужета током управљања. Након тога развијен подсистем за затезање ужета је монтиран на једну роботску јединицу и упарен са другом роботском јединицом како би се испитало управљање током кретања роботских јединица у контролисаним условима. Ова испитивања су извршена у лабораторијским просторијама (слика 9.2) и припадајућим отвореним просторима Машинског факултета у Нишу (слика 9.3).



Слика 9.2 Лабораторијско испитивање управљања подсистема за затезање ужета

Након успешно спроведених тестова у контролираним условима, спроведена су експериментална испитивања у реалним условима на једној од изабраних фарми. Приликом ових испитивања коришћене су све четири роботске јединице које су биле постављене на одређеној локацији (роботска јединица 1 - RJ1 се налази на позицији RS1, роботска јединица 2 - RJ2 на позицији RS2 итд.) и то је била почетна позиција роботских јединица – полигон наранџасте боје (слика 9.4). Након тога, роботске јединице су међусобно повезане са два реда ужади (позитивном и негативном жицом). У почетној позицији, растојање између два предња робота и растојање између два задња робота (RJ1 – RJ2 и RJ3 – RJ4) било је исто и износило је приближно 34 m. Растојање између два робота са леве стране (RJ2 – RJ3) било је исто као и између два робота са десне стране (RJ4 – RJ1) и износило је око 28 m.



Слика 9.3 Испитивање управљања подсистема за затезање ужета у контролираним условима



Слика 9.4 Почетна позиција и кретање роботских јединица

Током више спроведених експеримената изведени су различити сценарији кретања роботских јединица како би се пратио рад управљања подсистема за затезање ужета. Закључено је да су сценарији од највишег значаја за управљање били они у којима се једна или више роботских јединица крећу док се растојање између њих мења на следећи начин:

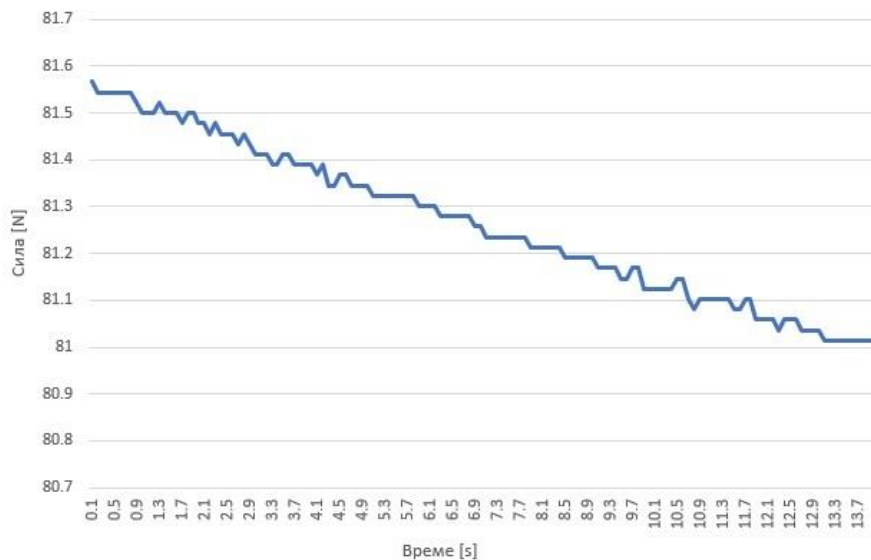
- Све роботске јединице се крећу при чему се мења њихово међусобно растојање;
- Три роботске јединице се крећу док једна мирује;
- Две роботске јединице се крећу док две мирују;
- Једна роботска јединица се креће док остале мирују.

Такође, тестирани су сценарији у којима се све роботске јединице крећу у истом правцу одржавајући удаљеност или се неки роботи крећу док други чекају.

У наставку је разматран најкомпликованији сценарио са становишта управљања подсистемом за затезање ужета – сценарио у коме се све роботске јединице крећу при чему се мења њихово међусобно растојање. Овај сценарио је изабран из разлога што је одступање од жељене силе затезања највеће. Током овог сценарија роботска јединица 1 (RJ1) се креће од почетне тачке RS1 до RS1', роботска јединица 2 (RJ2) се креће од почетне тачке RS2 до RS2' и тако даље. У овом сценарију задњи роботи (RJ3 и RJ4) одржавају растојање између себе, роботи са десне стране (RJ4 и RJ1) незнатно повећавају растојање, док се растојање између предњих роботских јединица (RJ1 и RJ2) смањује током кретања. Растојање између робота са леве стране (RJ2 и RJ3) је значајно повећано (крајње позиције робота – полигон беле боје) као што је приказано на слици 9.4.

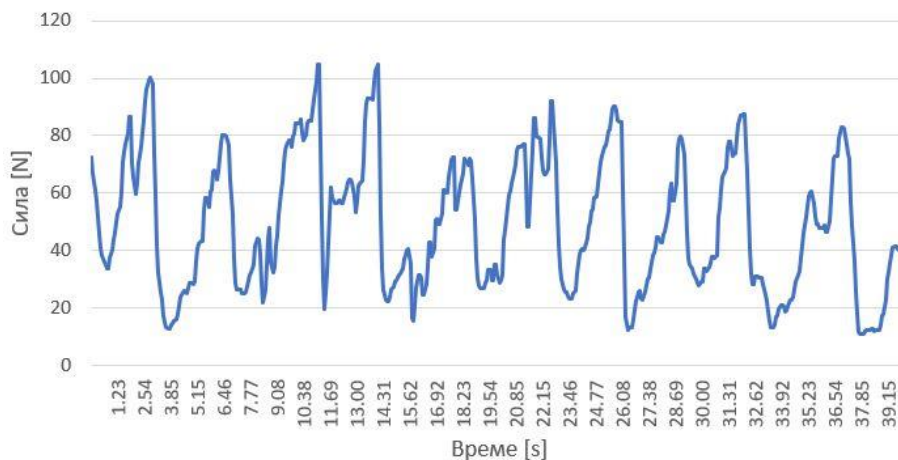
Током теренских испитивања Roboshepherd система дефинисано је више фактора који могу да утичу на исправан рад подсистема за затезања ужета. На слици 9.5 је приказана измерена сила у пару ужади између две роботске јединице током мировања. На слици се може видети да постоји врло мало одступање измерене вредности силе у односу на задату вредност која је у овом случају износила 80 N. Ово одступање се може приписати осцилацијама самог ужета које настају као последица затезања ужета или услед преласка роботских јединица из стања кретања у стање мировања, а такође могу настати и услед дејства фактора околине, као што је нпр. ветар. Закључено је да постојање ових одступања не утиче негативно на управљање подсистемом за затезање ужета, пошто су одступања јако мала у односу на задату вредност, а после неког времена нестану, услед смиривања ужета.

Међутим, већа одступања у затегнутости ужета се могу јавити током кретања роботских јединица. Прегледом података добијених са система за аквизицију података, закључено је да се највећи број одступања у затегнутости ужета јавља током сценарија где се све роботске јединице крећу и постоји промена растојања између неких роботских, тј. када постоји смањивање растојања између роботских јединица односно када се роботске јединице приближавају једна другој.



Слика 9.5 Измерена сила у пару ужади током мировања роботских јединица RJ1 и RJ2

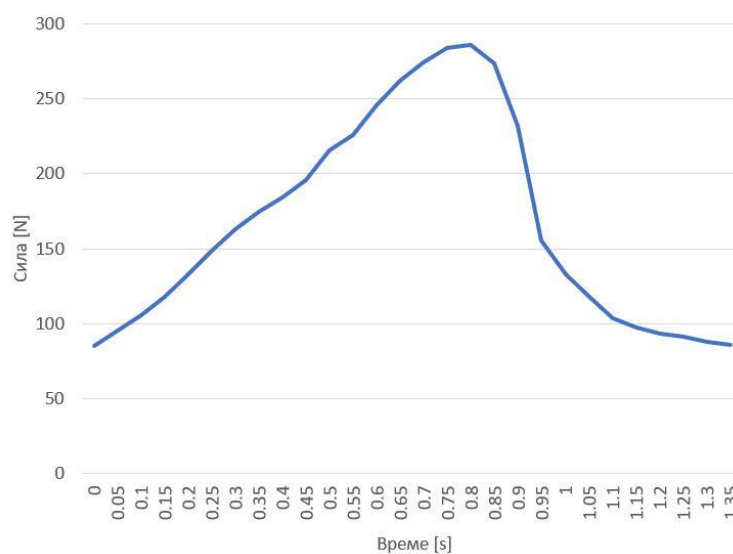
На слици 9.6 су приказана одступања силе затезања у пару ужади између роботских јединица RJ1 и RJ2. Задата сила у пару ужади је била 80 N, док се у току приближавања роботских јединица она константно смањивала и повећавала у опсегу од 16 N до 102 N.



Слика 9.6 Измерена сила у пару ужади између роботских јединица RJ1 и RJ2 током приближавања

Ове роботске јединице су узете у разматрање пошто су се код њих јавила највећа одступања у затегнутости ужади током кретања. Поред тога, прегледом GPS координата у току кретања, установљено је да су ове роботске јединице имале највише проблема да остану на задатом правцу, односно имале су највећа одступања у односу на задате контролне тачке кроз које су требале да прођу током кретања.

Ове варијације се могу појавити из више разлога. У експерименталном испитивању ужади (поглавље 7.3) која се користе за ограду установљено је да су она вискоеластична, тако да се не понашају увек исто током затезања или растеређивања. Други фактор који доприноси варијацијама силе је време које је потребно да информације са сензора силе дођу до контролера. Сензор који мери силу у пару ужади се налази на једној роботској јединици и мери силу затезања у ужади коју ствара подсистем за затезање ужета који је монтиран на другој роботској јединици. Ток информација о сили затегнутости је такав да се током процеса затезања ужета, вредност локално измерене сила са једне роботске јединице бежично шаље у управљачки алгоритам подсистема за затезање ужета на другој роботској јединици. Ово може довести до кашњења у одговору управљања затезања ужета што може довести до немогућности одржавања ужета у задатој константној тензији односно до недовољног затезања ужета. На слици 9.7 је приказан тренутак када креће удаљавање роботских јединица. На слици се може видети да сила са 85 N расте до 285 N и да је потребно око 0.8 s да подсистем за затезање ужета одреагује и крене са одмотавањем ужади како би сила кренула да пада.



Слика 9.7 Измерена сила у пару ужади између роботских јединица RJ1 и RJ2 током удаљавања

Поред тога роботске јединице се крећу по неравном као и терену под одређеним нагибом, што може довести до изненадне промене нагиба саме роботске јединице као и вертикалног носећег стуба, што даље изазива изненадно затезање или опуштање ужади у огради, у зависности од тога на коју страну се роботска јединица нагнула. Као могуће решење за превазилажење појаве великих одступања силе затегнутости у ужади, у наставку је предложена реализација интелигентног система за управљање коришћењем вештачке интелигенције која би могла да прорачуна вредност силе у ужади коришћењем података прикупљених са различитих сензора монтираних на роботским јединицама, као и неких од података добијених током управљања подсистемом за затезање ужета.

9.2 Технике вештачке интелигенције

Развој рачунарстава и рачунарске технике, поготово на пољу брзине обраде података као и складиштења, омогућио је развој технологија и њихову примену кроз различите сложене апликације које током рада користе велике количине података при чему се од њих захтева висока прецизност и брза обрада. Једна од најкориснијих технологија која је развијена је свакако вештачка интелигенција AI (*енгл. Artificial Intelligence*) која је нашла примену у готово свим пољима људског рада и директно или индиректно утиче на квалитет живота људи. Термин „вештачка интелигенција“ је сковао Џон Макарти (John McCarthy) са Универзитета Станфорд (Stanford University) 1956. године, а његов рад „Програми са здравим разумом“, који је објављен 1958. године, се сматра првим о логичкој вештачкој интелигенцији. Област вештачке интелигенције је заснована на претпоставци да се централна особина људи, интелигенција, може тако прецизно описати да се може симулирати помоћу машине. Макарти је дефинисао AI као „науку и инжењеринг за прављење интелигентних машина“ док се данас AI сагледава као „проучавање и дизајн интелигентних агената“, где је интелигентни агент систем који перципира своје окружење и предузима акције које максимизирају његове шансе успеха у одређеном задатку. Може се рећи да вештачка интелигенција аутоматизује људску интелигенцију на основу начина на који људски мозак обрађује информације. Кад год се решава неки проблем или просто комуницира са људима, пролази се кроз неки процес. Ако се ограничи опсег проблема или интеракције, овај процес врло често може да буде моделован и аутоматизован. Неки кључни атрибути вештачке интелигенције укључују закључивање, учење из искуства, планирање, препознавање образаца итд. [130], [131].

Стога, за креирање употребљивих AI решења потребно је укључити различите дисциплине, попут [131]:

- Статистике – за извођење корисних резултата, предвиђања будућности и анализу прошлости;
- Психологије/биологије – за моделовање начина функционисања људског мозга;
- Математике – за извршавање сложених математичких операција;
- Физике – за моделовање реалног света;
- Софтверског инжењерства/рачунарског програмирања – за креирање одрживих решења и имплементирање софтверских решења у пракси;
- Теорије алгоритама – за конструисање ефикасних алгоритама;
- Теорије информација – за представљање, кодирање/декодирање и компресовање информација;
- Теорије графикона – за моделовање и оптимизовање различитих тачака у простору и за представљање хијерархија;
- Теорије управљања – за креирање система управљања;
- Роботике – за манипулацију објектима у простору;
- Рачунарске графике и обраде слика – за приказ и обраду слика и видео материјала.

Вештачка интелигенција описује радне процесе машина који би захтевали одређени ниво интелигенције ако би их обављали људи. Вештачка интелигенција се може посматрати и као истраживање интелигентног понашања у решавању проблема и стварање интелигентних рачунарских система. Вештачка интелигенција се може поделити на два типа:

- Слаба вештачка интелигенција (*енгл. Weak Artificial Intelligence*) - Рачунар је само инструмент за истраживање когнитивних процеса – рачунар симулира интелигенцију. Већина напретка у AI, који је постигнут до данас, може се класификовати као слаба AI.
- Јака вештачка интелигенција (*енгл. Strong Artificial Intelligence*) - Процеси у рачунару су интелектуални процеси где AI има могућност самосталног учења. Рачунари могу да „разумеју“ помоћу одговарајућег софтвера/програмирања и могу да оптимизују сопствено понашање на основу свог претходног понашања и свог искуства. Такође, могуће је и аутоматско умрежавање са другим машинама.

Међутим, јака AI је контроверзан и споран концепт. Многи трансхуманисти сматрају да јака вештачка интелигенција може имати самосвест и постати еквивалент људској интелигенцији. Једном када јака вештачка интелигенција постане стварност, експлозија интелигенције ће бити убрзана и технолошка сингуларност - тачка у времену у којој технолошки раст постаје неконтролисан и неповратан, што резултира непредвидивим променама за људску цивилизацију, може бити неизбежна. Суперинтелигенција се може појавити скоро одмах након тога. Суперинтелигенција се може дефинисати као „сваки интелект који у великој мери превазилази когнитивне перформансе људи у практично свим доменима интересовања“. Другим речима, јака AI би била у стању да надмаши људе у скоро сваком когнитивном задатку [132], [133].

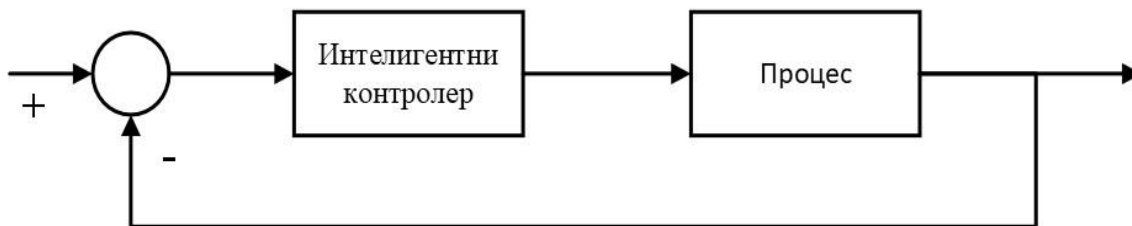
9.2.1 Вештачка интелигенција и роботика

Већина процеса којима смо изложени, попут процеса у природи или процеса у свету који је створио човек показује динамичко понашање. Процеси попут временске прогнозе или процеса који се јављају у индустрији имају заједничку карактеристику да се мењају током времена. Контрола промена, односно управљање динамичним понашањем процеса је одувек био изазов за научну заједницу. Систем управљања треба да задовољи различите захтеве, односно да омогући сузбијање спољашњих сметњи, осигура стабилност самог процеса као и да оптимизује учинак процеса. Пошто процесе, уопштено узевши, карактерише велика димензионалност, јака интеракција између процесних променљивих као и нелинеарно понашање, систем управљања треба да буде пројектован тако да укључује све ове факторе, а притом треба да буде у стању да издржи изненадне промене у окружењу, немерљиве поремећаје, кварове компоненти, итд. како би се спречиле могуће последице услед неправилног рада. Због тога је велики изазов развити робусно, адаптивно управљање које може да настави са радом иако се појави неки проблем у самом систему. Отуда се јавила потреба за системима који поседују неки облик „интелигенције“ односно треба да буду робусни и прилагодљиви [134].

Промене у окружењу, немерљиве сметње, промене референтних модела као и кварови компоненти су неке од карактеристика због којих је потребно користити интелигентно управљање [135]. Систем треба да буде у стању да учи из свог искуства како би постигао неки облик „интелигенције“. Рачунарска технологија је достигла тачку где се машинска интелигенција може уградити у многе системе које се свакодневно користе. Интелигентно управљање се користи на различите начине и за различите људе значи различите ствари. Интелигентно управљање укључује једну особину која је

разликује од других врста управљања, а то је способност учења. Систем који има способност да осети своју околину, обради информације да смањи несигурност и планира, генерише и изврши управљачку акцију за више ситуација представља интелигентни управљачки систем [134].

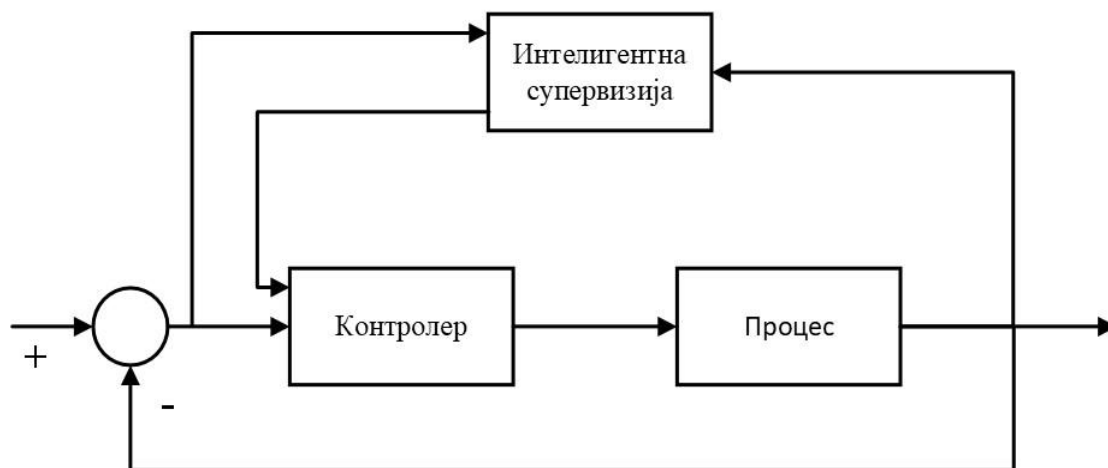
Изазов за сваки интелигентни управљачки систем састоји се из две фазе [136]. Прва фаза обухвата комбиновање читавања са различитих сензора у кохерентну и тачну слику окружења. У другој фази се врши процена акција која обично захтева предвиђање њихових последица како би се утврдила њихова погодност за дату ситуацију. Интелигентни управљачки системи имају две јединствене карактеристике које их разликују од конвенционалних управљачких система, а то су „способност доношења одлука“ и „способност учења“. Интелигентни системи управљања могу се класификовати у две категорије, директно интелигентно управљање и индиректно интелигентно управљање [137]. На слици 9.8 је приказан директни интелигентни систем управљања. Код овог типа управљања интелигентна управљачка компонента је укључена директно у управљачку петљу.



Слика 9.8 Директни интелигентни систем управљања

На слици 9.9 је приказан индиректни интелигентни систем управљања. Код овог типа управљања контролер је надгледан од стране интелигентног супервизора. Контролер који се користи може бити конвенционални или интелигентни контролер.

Развој техника вештачке интелигенције је омогућио замену класичних метода управљања интелигентним, које користе вештачку интелигенцију, како би се идентификовале управљачке акције које су локално и глобално пожељне на основу знања и разумевања о процесима којима се управља, наспрот класичним методама управљања које идентификују локално оптималне управљачке акције на основу математичких модела праћених процеса. Применом више знања и различитих метода процене, приступ AI може да одговори на ситуације у којима класичне методе управљања не могу.



Слика 9.9 Индиректни интелигентни систем управљања

AI систем управљања користи глобалну перспективу процеса, надгледајући многе различите параметре како би се изабрале акције које одговарају циљевима процеса. На пример, код класичног управљања са повратном спрегом контролер одмах реагује на сваку вредност коју добије за сваки од неколико параметара који се прате, прилагођавањем улаза неком излазу. С друге стране, AI систем може да упоређује вредности из различитих сензора, фокусирајући се на параметре релевантне за тренутне задатке као и да филтрира податке на одговарајући начин како би сачувао своје рачунарске ресурсе.

Одабрани токови података и тип филтрирања се мењају како се мењају окружење и потребе система управљања. Поред тога, AI систем управљања може да користи и понашање контролера у реалном времену као податке. AI систем користи више знања и извршава сложеније прорачуне да би закључио о абнормалностима када основне претпоставке класичног управљања више нису испуњене или када су оперативне границе прекорачене [134].

Примена AI у роботизици је донела огромне промене у различитим социоекономским аспектима нашег друштва. Интелигентна роботика има за циљ да створи машине које су способне да посматрају, размишљају и поступају попут људи у одређеним ситуацијама. Данас роботи постају интелигентне машине које користе своје AI способности и памет да брзо и паметно обављају задатке. Роботика и AI заједно чине да машина обавља неке задатке као човек [138].

Док ће интелигентни рачунари једног дана моћи да „размишљају“ као човек, интелигентни робот ће моћи да делује и обавља све задатке на начин сличан човеку. AI технологије имају потенцијал да играју улогу у разноврсности робота, укључујући

роботе за пратњу и бригу, попут хуманоидног типа, аутономна копнена, ваздушна и поморска возила, роботских ројева, робота за претрагу и спасавање, робота за сервис и склапање, разних војних робота и интелигентних протеза. Многи аспекти AI имају важну улогу, укључујући препознавање говора, спретну манипулацију, аутономну навигацију, машински вид, препознавање образаца, локализацију и мапирање, заједно са могућностима које су у самом срцу напредне вештачке интелигенције, као што су учење из искуства и предвиђање исхода акција [130].

Стога је вештачка интелигенција део рачунарске науке, а такође и део роботике за когницију и одлучивање. Имплементацијом вештачке интелигенције роботика је постала технологија која се веома брзо развија, нудећи многе могућности за задатке аутоматизације у различитим областима примене, попут истраживања свемира, медицинских процедура, војне примене, прикупљања података о ваздушном притиску, температури, клими, ветру итд. Данас се роботи могу пронаћи не само на послу, већ и у домовима, као и у индустрији, аутоматизујући или замењујући послове који су опасни и исцрпљујући [138], [139].

На основу научних публикација и примера из праксе, може се закључити да највише утицаја у области управљања у роботизи имају приступи засновани на вештачкој интелигенцији попут:

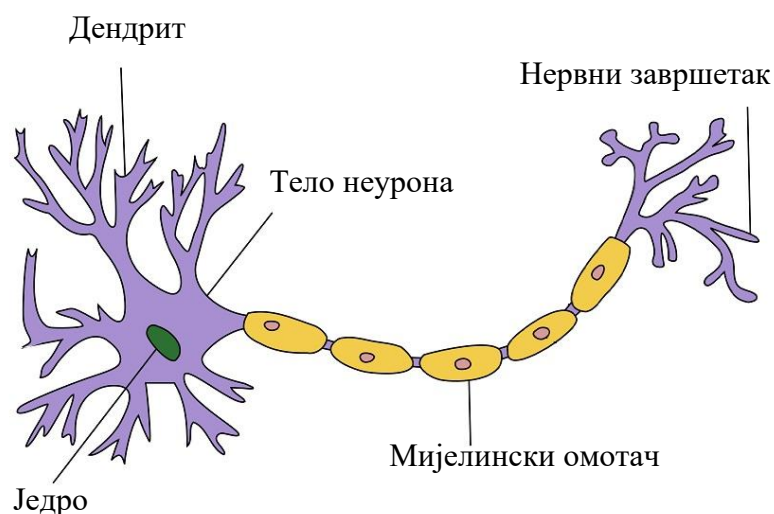
- Вештачких неуронских мрежа ANN (*енгл. Artificial Neural Network*);
- Фази логике FL (*енгл. Fuzzy Logic*);
- Адаптивног неуро-фази система закључивања ANFIS (*енгл. Adaptive Neuro Fuzzy Interference System*);
- Генетских алгоритама GA (*енгл. Genetic Algorithms*);
- Оптимизације путем роја честица PSO (*енгл. Particle Swarm Optimization*) и других.

9.2.2 Вештачке неуронске мреже

У управљању системима претпоставља се да општи, аналитички модел система може да се дефинише. Међутим, у машинском инжењерству се углавном користе комплексни системи, попут авиона, аутомобила или робота, као и различити технолошки процеси, који су јако компликовани, што доводи до тога да се општи модел тешко може успоставити. Као решење за овакве случајеве могуће је применити вештачке неуронске мреже као универзалне апроксиматоре, како би се нпр. успешно решили

проблеми попут доношења одговарајућих одлука на основу анализе технолошког процеса, а када не постоји експлицитни модел. Поред тога, ANN се могу користити и као софистицирани сензори који треба да изврше процену вредности сигнала или променљивих у неком процесу, уз одговарајући избор скупа стабилних нумеричких података уз помоћ којих се довољно верно описује сам тај процес. Као резултат студије спроведене у Сједињеним Америчким Државама, закључено је и опште прихваћено да вештачке неуронске мреже обезбеђују значајне предности при решавању проблема процесирања који захтевају рад у реалном времену и интерпретацију односа између променљивих у вишедимензионалним просторима [140].

Вештачке неуронске мреже су једна од грана вештачке интелигенције. Настале су по узору на биолошке неуронске мреже, односно као инспирација за развој је послужила архитектура људског мозга. Неуронска мрежа је заправо математички модел који се користи како би се описао начин на који људски мозак решава проблеме. У складу са тим, под вештачком неуронском мрежом се подразумева математички модел, док када се говори о биолошкој неуронској мрежи говори се о мозгу људи. Према узору на људски мозак, вештачке неуронске мреже су такође системи који се састоје од повезаних неурона који међусобно комуницирају шаљући поруке једни другима. Везе између неурона имају тежинске коефицијенте који се могу мењати током тренирања мреже у зависности од искуства, што омогућава прилагодљивост и способност за учење. ANN се могу посматрати и као алгоритми надгледаног учења. Модел ANN има већи број унутрашњих променљивих, што омогућава да однос између улазних и излазних променљивих може проћи кроз више унутрашњих слојева. Због тога, када се пореде са другим алгоритмима надгледаног учења ANN дају већу тачност [131], [141].



Слика 9.10 Биолошки неурон [142]

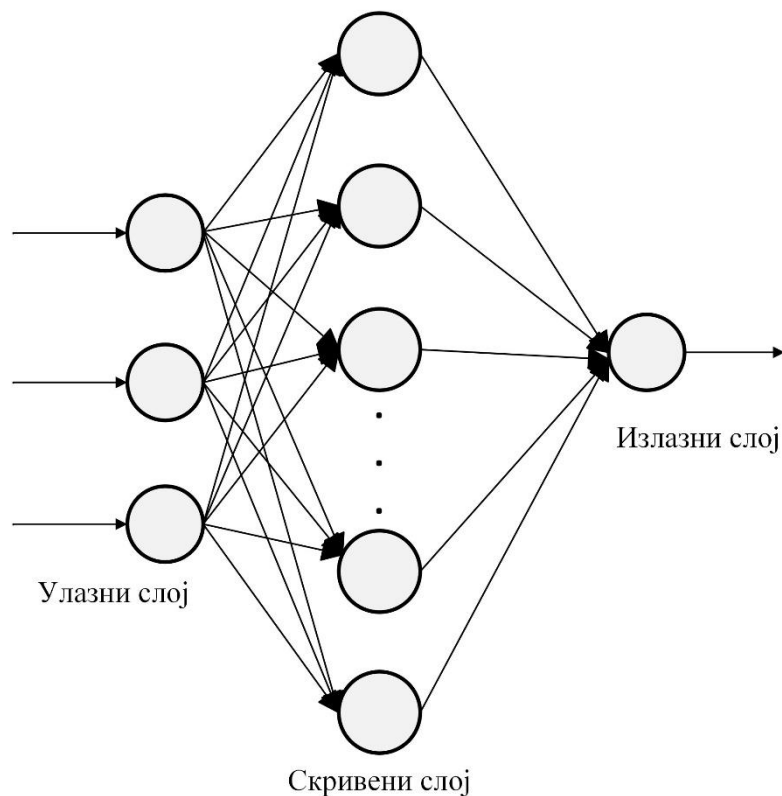
Биолошки неурон (слика 9.10) се састоји од тела ћелије које садржи једру и друге ћелијске органеле, дендрита – разгранате структуре која сакупља информације од претходног неурона и шаље их ћелијском телу, аксона односно нервног влакна – структури налик на дугачки цилиндар, а преко кога се налази изолатор - мијелински омотач. Аксон носи информације од тела ћелије до нервних завршетака. На крају аксона се налазе разгранати нервни завршеци који се називају телодендрони, док се на њиховим врховима образују синапсе уз помоћ којих се врши повезивање са дендритима других неурона. Између синапси постоји синаптичка пукотина, односно међу простор између два неурона где се сигнали преносе помоћу хемијских агенаса који се називају неуротрансмитери. Биолошки неурони производе кратке електричне импулсе који се називају акциони потенцијали који путују дуж аксона и подстичу синапсе да отпуштају неуротрансмитере. Када неурон добије одговарајућу дозу неуротрансмитера он окида сопствени електрични импулс који се даље шаље до другог неурона. Иако се на први поглед чини да се биолошки неурони понашају на једноставан начин, они су заправо организовани у мрежу која се састоји од милијарди неурона где је сваки неурон повезан са хиљадама других неурона. Иако се о архитектури биолошких неуронских мрежа и даље недовољно зна, одређена истраживања на деловима мозга који су мапирани, показују да су неурони често организовани у узастопне слојеве поготово у кори великог мозга [143].

Настанак неуро-рачунарства је везан за четрдесете године двадесетог века када су неуро-физиолог Ворен Мекулох (Warren McCulloch) и математичар Волтер Питс (Walter Pitts) објавили рад под називом: „Логички рачун идеја својствених нервној активности“ [144]. Том приликом Мекулох и Питс су предложили једноставан али значајан М-П модел. У предложеном моделу неурон је посматран као функционални логички уређај, чиме је започето теоријско истраживање модела неуронске мреже. 1949. године Доналд Хеб (Donald Hebb) је изашао са хипотезом да је интензитет веза између синапси променљив. Предложена хипотеза сугерише да се процес учења заправо дешава на синаптичком интерфејсу између неурона, а да интензитет веза између синапси варира у зависности од активности неурона пре и после саме синапсе. Другим речима ова хипотеза говори да је јачина синаптичке везе између неурона променљива, а да је та променљивост основа учења и памћења. Предложена хипотеза је касније еволуирала у Хеб-ово правило које се користи код неуронских мрежа и у основи је конструисања модела неуронских мрежа са функцијом учења. На основу М-П модела, 1957. године Френк Розенблат (Frank Rosenblatt) је предложио модел неуронске мреже под називом

перцептрон (*енгл. Perceptron*), који има могућност континуалног подешавања тежинских коефицијената. Недуго затим, Бернард Видро (Bernard Widrow) и Тед Хоф (Ted Hoff) развијају прву вештачку неуронску мрежу која може решава практичне проблеме. Адаптивни линеарни елемент ADALINE (*енгл. Adaptive Linear Element*) модел мреже је континуални адаптивни линеарни модел неуронске мреже који се може користити за адаптивне системе. У даљем истраживању, Мински (Marvin Minsky) и Паперт (Seymour Papert) су спровели математичку студију над функцијама и ограничењима везаним за мрежне системе који се моделирају перцептронима. Након што су показали да неуронске мреже на бази перцептрона имају ограничење, односно да не могу да имплементирају логичку операцију искључиво ИЛИ (*енгл. Exclusive OR - XOR*), истраживања неуронских мрежа су привремено стагнирала. Међутим, седамдесетих година појављују се истраживачи попут Кохонена (Teuvo Kohonen), Гросберга (Stephen Grossberg) и других који дају велики допринос овој области. На пољу развоја вештачких неуронских мрежа се појављују самоорганизујуће мреже, њихове побољшане верзије, перцептрони добијају додатне слојеве и сл. 1982. године Хопфилд (John Hopfield) предлаже дискретну неуронску мрежу. Хопфилдов модел мреже обезбеђује динамичке једначине и једначине учења, а такође остварује велики допринос повезујући неуронске мреже са физичким системима и величинама. Због великог потенцијала Хопфилдових неуронских мрежа, све више истраживача се окреће овом пољу чиме долази до великог развоја неуронских мрежа. Велики пробој на овом пољу је остварен када је предложен алгоритам са простирањем уназад (*енгл. Backpropagation*) како би се решио проблем тежинских коефицијената код вишеслојних неуронских мрежа. Доказано је да вишеслојне неуронске мреже имају велику способност учења, да могу извршити различите задатке везане за учење и решити многе практичне проблеме. Велика популарност неуронских мрежа доводи до тога да се од почетка деведесетих година њихово изучавање уводи у регуларни наставни програм, чиме истраживања на овом пољу почиње да бива све масовније. Од тада готово да не постоји област у којој се примењује вештачка интелигенција, а да није анализирана примена вештачких неуронских мрежа [145], [146], [141], [147].

Као што је већ речено, вештачка неуронска мрежа је настала на основу биолошке неуронске мреже и функционише слично функционисању људског мозга. Ако би се повукла паралела између једне и друге мреже, може се рећи да би код ANN дендрит био улаз у мрежу, у ћелијском телу би се извршавала израчунавања, док би се аксон понашао као излаз из мреже. Основна идеја ANN је да се на рачунару симулира одређени број

међусобно повезаних неурона како би се омогућило доношење одлука, препознавање шаблона и слично на начин сличан човековом, при чему се вештачка неуронска мрежа не програмира експлицитно да учи, већ она то ради сама, као што ради и мозак код људи. Вештачка неуронска мрежа се састоји од најмање 3 слоја – улазног, скривеног и излазног слоја. Неурони у улазном слоју служе да добијају информације из спољашњег света, док неурони у излазном слоју показују како се мрежа понаша у односу на научене информације. Између улазног и излазног слоја неурона се налази један или више скривених слојева за које се може рећи да чине вештачки мозак. Неурони из једног слоја су међусобно спојени са неуронима из претходног и следећег слоја (слика 9.11). Важно је напоменути да неурони у оквиру једног слоја, нпр. скривеног међусобно нису спојени, односно немају међусобних веза.



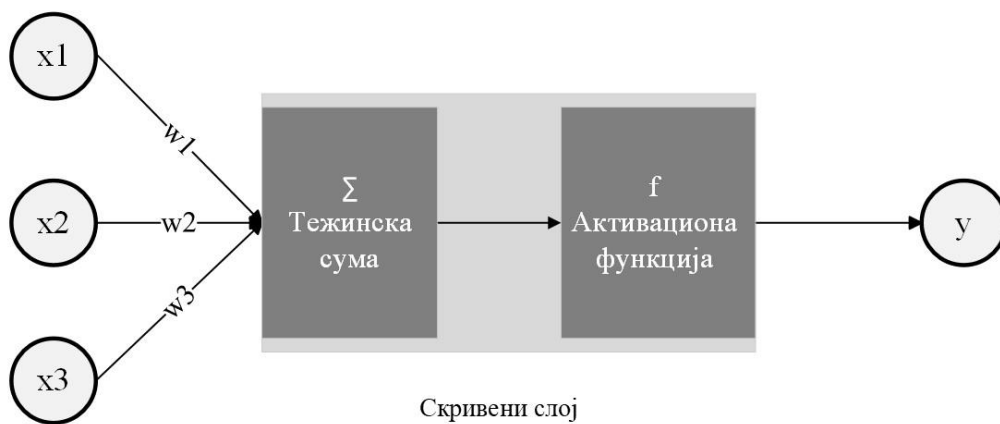
Слика 9.11 Вештачка неуронска мрежа са једним скривеним слојем

Везе између неурона се представљају бројевима који се називају тежине, односно тежински коефицијенти w_i . Подаци x_i из улазног слоја носе различите информације, међутим како нису све информације подједнако битне, потребно је да се на излазу појаве утицаји само оних које су валидне за дати процес. Како би се ово решило, вредности из улазног слоја се скалирају тежинским коефицијентима и збирно посматрају у оквиру тежинске суме. Ако је ова сума већа од вредности прага (енгл. *Threshold*) сигнал ће бити

модификован активационом функцијом f која управља излазном вредношћу неурона и неурон ће произвести излаз, односно побудиће неуроне у следећем слоју. У случају да је тежинска сума мања од прага, доћи ће до инхибиције. Ако се овај поступак упореди са биолошким неуронским мрежама може се увидети да ово одговара начину на који биолошки неурони побуђују једни друге кроз синапсе.

На слици 9.12 је приказан модел вештачког неурона, где су:

- x_i – улази вештачког неурона,
- w_i – тежински коефицијенти,
- Σ – тежинска сума,
- f – активациона функција,
- y_i – излази из неурона.



Слика 9.12 Модел вештачког неурона

Ток информација кроз неуронске мреже може да се одвија на два начина:

- Простирањем унапред (*енгл. Feedforward*);
- Простирањем уназад (*енгл. Backpropagation*).

Код ANN са простирањем унапред, током тренирања или рада саме мреже након што је истренирана, информације улазе путем улазног слоја, прослеђују се неуронима у скривеном слоју, у зависности од тежинских сума неки неурони се побуђују да би на крају био генерисан излаз у излазном слоју. Овакав тип мреже у виду перцептрона је један од првих типова вештачке неуронске мреже који је развијен.

Код ANN са простирањем уназад постоји повратна информација, односно излаз који мрежа генерише током тренирања се пореди са излазом које је требало да генерише (на основу већ познатих података улаза и излаза који се користе за тренирање мреже). Разлика између генерисаних и жељених излаза се користи како би се кориговали

тежински коефицијенти у мрежи. Пошто се ради о повратном ходу, најпре ће се кориговати тежински коефицијенти који су најближи излазном слоју, затим из следећег слоја и тако све до улазног слоја крећући се уназад. Може се рећи да ове мреже уче као и људи када нешто раде први пут приступом покушаја и грешке. Нпр. дете које гађа на кош посматра лопту и путању којом иде. Ако дође до промашаја, при следећем бацању мозак се сећа прорачуна, закључује где је погрешно и коригује покрете тела у складу са тим, како би се постигао жељени исход. Кроз више оваквих покушаја коначно се постиже жељени циљ и мозак ће запамтити шта је потребно за то. На сличан начин ANN са повратним ширењем грешке ће подешавати тежинске коефицијенте све док не дође до жељеног исхода, односно док грешка између израчунатог и задатог излаза не падне испод прихватљиве границе. Са довољним бројем одговарајућих података овакав тип мреже се може веома успешно користити за препознавање или предвиђање [146], [141].

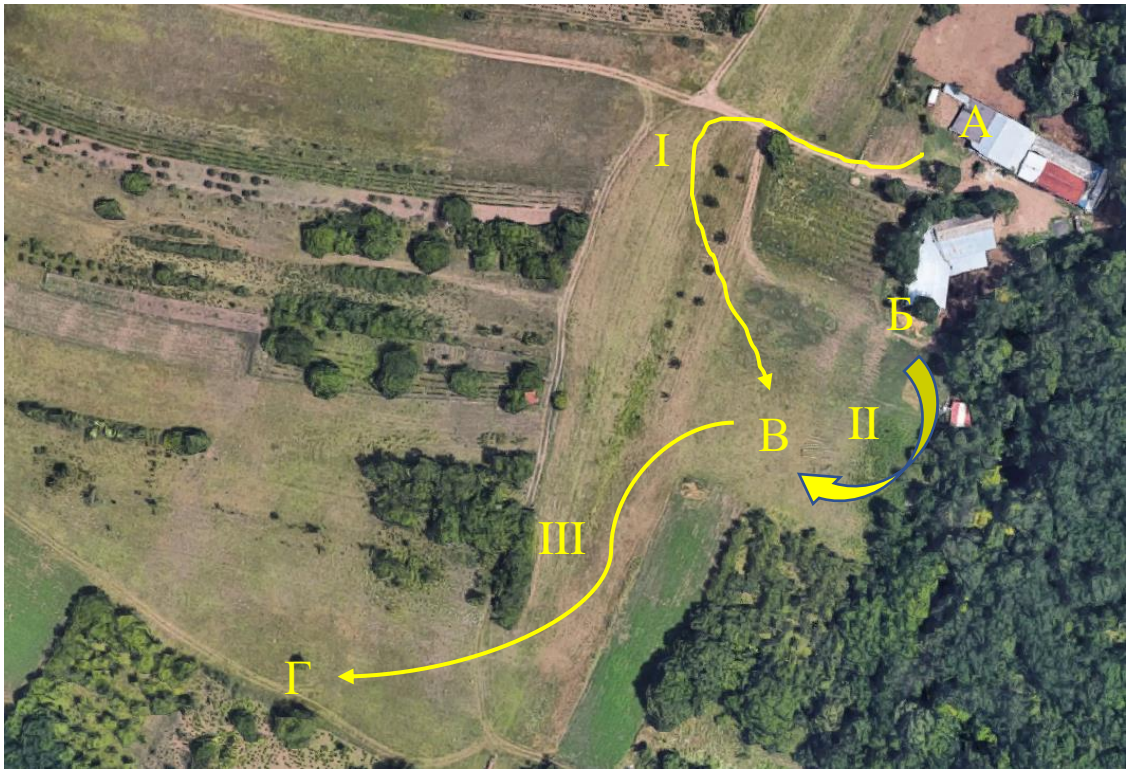
9.3 Прикупљање и обрада података за развој интелигентног управљања подсистема везе роботских јединица

Како би се добили експериментални подаци за пројектовање и развој вештачке неуронске мреже која би служила за предвиђање силе затезања, Roboshepherd систем је тестиран два месеца на изабраној фарми.

Тестирање система Roboshepherd је спровођено у три фазе (слика 9.13). Фаза 1 је обухватала довођење 4 роботске јединице из гараже (А) до почетне тачке (В). На овом месту је Roboshepherd систем постављен у иницијалну позицију – четири роботске јединице су постављене у квадратни облик страница 25 x 25 m. Након тога је формирана електрична ограда са три стране система. У случају да су рађена тестирања без животиња одмах је формирана ограда и са четврте стране.

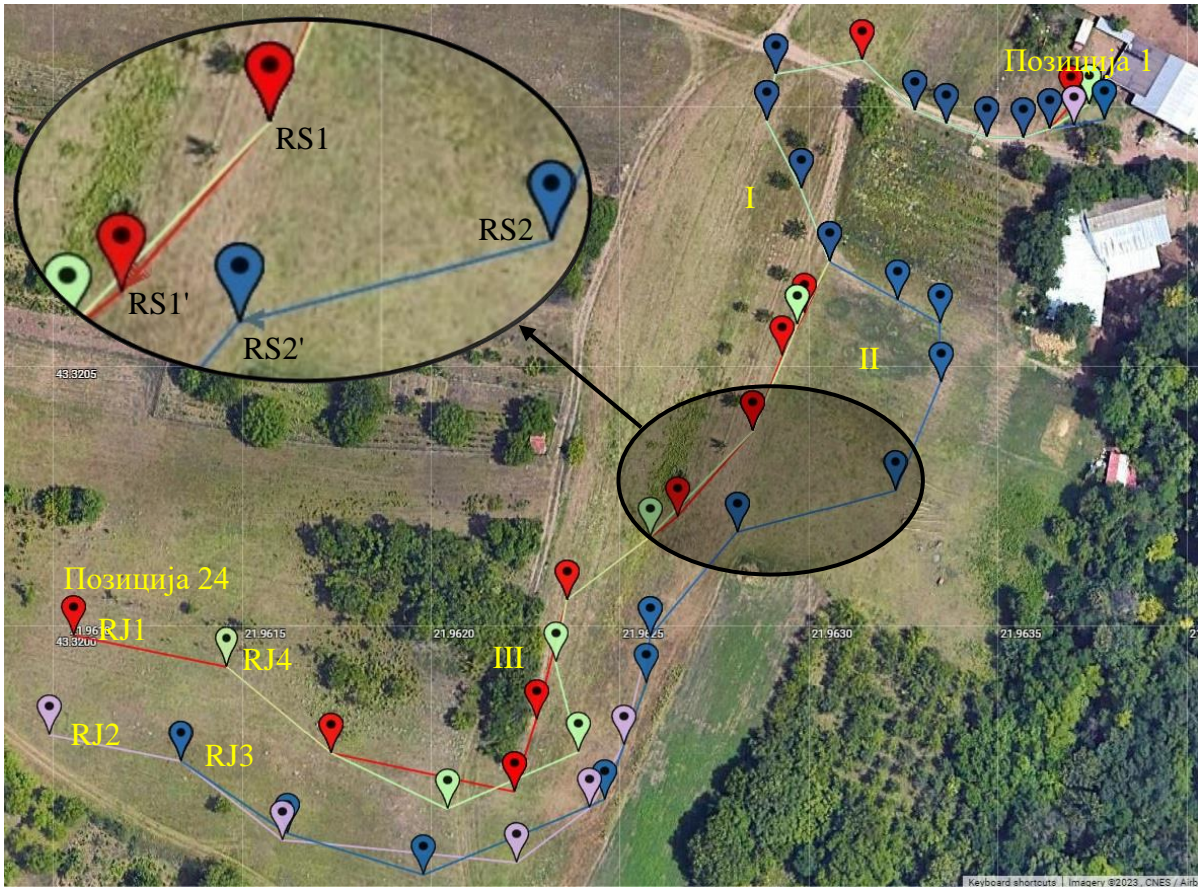
Фаза 2 је обухватала увођење животиња из штале (Б) у Roboshepherd систем кроз четврту страну која није била затворена. Након што су све животиње биле унутар система формирана је електрична ограда и на четвртој страни.

Фаза 3 је даље обухватала одвођење на пашњак и управљање испашом. Као експериментални пашњак се користио релативно равна травњак површине око 60 ари. Крдо које се састојало од 289 оваца је довођено на овај пашњак на испашу. Током испаше Roboshepherd систем је окруживао животиње на површини од око 10 ари. Када је било потребно систем би померио крдо на следећу локацију.



Слика 9.13 Фазе извођења експеримента са животињама

Тест је спроведен тако што свака роботска јединица има своје задате координате при чему систем иде од једне до друге координате од почетне до крајње тачке. Када све роботске јединице дођу на задате координате прве тачке, систем је спреман за прелазак на координате следеће задате тачке. Путања RoboShepherd система је приказана на слици 9.14. Путања за RoboShepherd систем је подељена на 24 позиција у којима свака роботска јединица има своју координату. Током тестова роботска јединица 1 је прелазила 353 m од почетне до крајње позиције, роботска јединица 2 – 408 m, роботска јединица 3 – 385 m и роботска јединица 4 – 332 m. За потребе прикупљања података за ANN узет је тренутак на почетку треће фазе када роботска јединица 1 прелази из позиције RS1 и креће се до позиције RS1', а роботска јединица 2 прелази из позиције RS2 и креће се до позиције RS2'. У току кретања између ових позиција прикупљени су подаци о позицији роботских јединица RJ1 и RJ2, PWM сигналу за контролу напона мотора који намотава или одмотава ужад, јачини струје мотора, као и сили у ужади између ове две роботске јединице. Прикупљени подаци су касније коришћени за израду вештачке неуронске мреже.

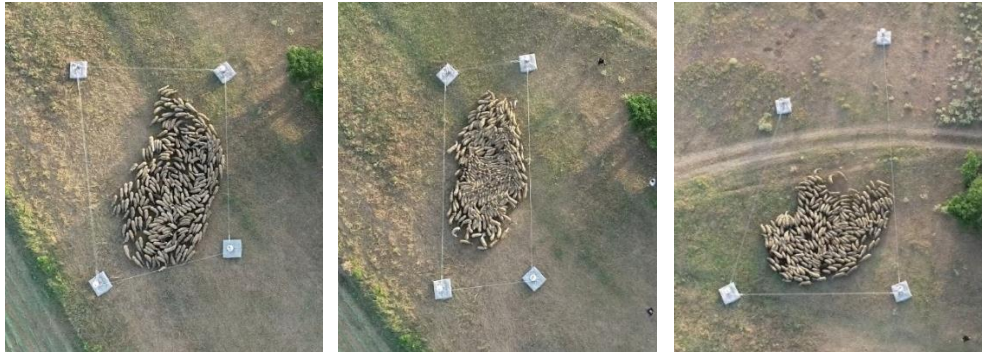


Слика 9.14 Путање роботских јединица током тестова

Експериментална испитивања су показала да развијени систем извршава све задатке за које је пројектован. Функције попут аутономног кретања роботских јединица и одржавања потребне затегнутости ужади електричне оgrade, током одвођења и довођења стада са испаше и управљања испашом, су у потпуности испуњене. На сликама 9.15–17 су приказане различите формације Roboshepherd система током тестирања са животињама.



Слика 9.15 Roboshepherd систем током тестирања са животињама



Слика 9.16 Roboshepherd систем – различите формације



Слика 9.17 Roboshepherd систем – долазак на пашињак

9.4 Вештачка неуронска мрежа за предвиђање силе у ужету

За потребе предвиђања силе у ужету коришћена је стандардна вештачка неуронска мрежа са простирањем уназад. ANN је пројектована тако да има четири слоја: улазни слој, два скривена слоја и излазни слој. Променљиве које се користе у улазном мрежном слоју су вредност PWM-а, који је коришћен за контролу брзине мотора, јачина струје у мотору која је мерена преко сензора струје и удаљеност између две роботске јединице. Удаљеност између роботских јединица израчуната је на основу података о позицијама које су добијене путем GPS-а који је монтиран на свакој роботској јединици. Растојање је израчунато коришћењем Haversine формуле [128] која израчунава удаљеност користећи географску ширину и дужину. Користећи ову формулу израчунава се најкраће праволинијско растојање између две дате локације. Променљива у излазном слоју мреже је била укупна сила у пару ужади која је мерена користећи сензор силе.

За креирање предложене ANN коришћен је део података који су прикупљени из горе поменутог сценарија где се све роботске јединице крећу. Четири сета од којих се сваки састоји од 523 податка који се користе за креирање ANN-а, односе се на две

предње роботске јединице RJ1 и RJ2 током кретања. Почетно растојање између робота RJ1-RJ2 је било 34 m, док је коначно растојање било 14 m. Током теста, роботска јединица 1 прешла је 20,8 m од позиције RS1 до RS1', док је роботска јединица 2 прешла 32,7 m од позиције RS2 до RS2'. Измерена укупна сила у ужади се налазила у опсегу вредности од 11 N до 105 N, док је највећа струја мотора износила 15 A.

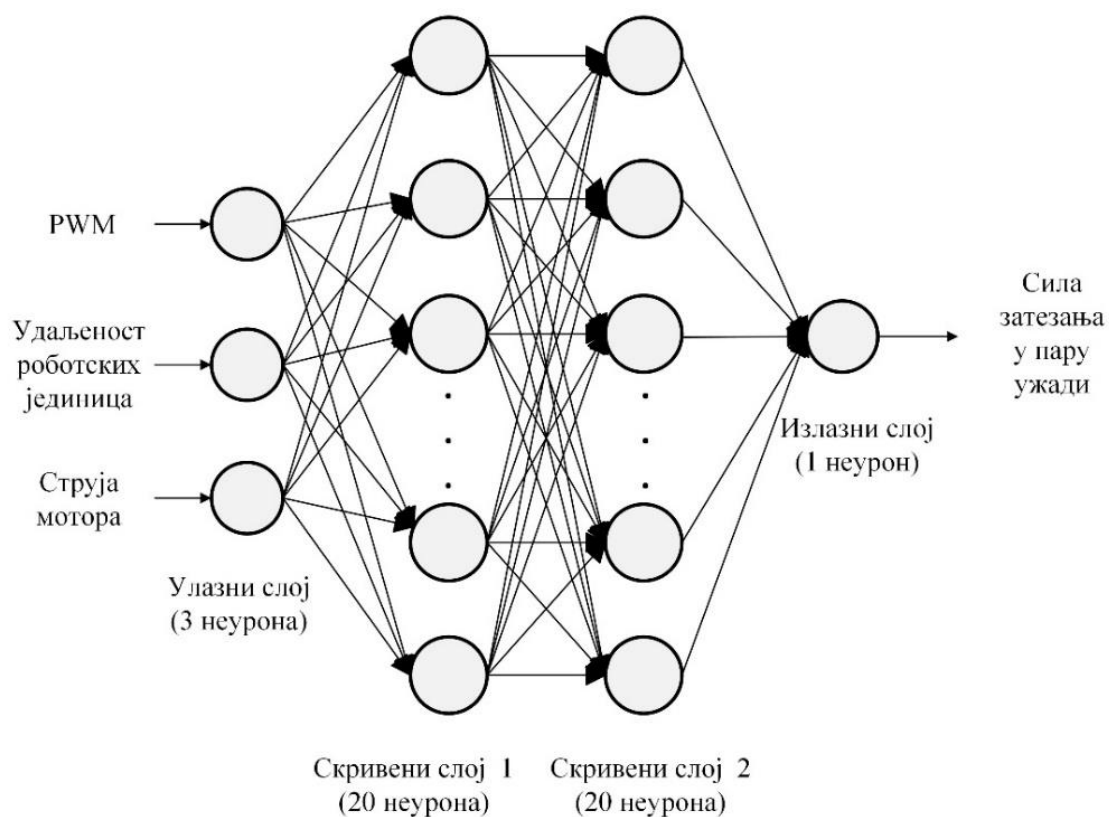
У табели 4 је приказано неколико сетова података који су добијени током тестова. Како би се исправно одредило растојање између роботских јединица у Haversine формули су коришћени подаци о географској ширини и дужини снимљени у истом тренутку на обе роботске јединице. Овај тренутак је могуће прецизно одредити користећи податке о времену (сат, минут и десетина секунде) који су добијени од стране GPS-а. Такође, користећи податке о времену упарени су подаци из истог тренутка који се односе на јачину струје мотора и PWM сигнала који су добијени са једне роботске јединице са измереном силом у ужади који су добијени са друге роботске јединице. Дуплирани подаци који су снимљени нпр. када роботске јединице стоје или када није било промена других релевантних променљивих, су избачени као непотребни. Након обраде података направљена је табела са релевантним подацима који су се даље користили за обуку вештачке неуронске мреже.

Табела 4 Подаци добијени током тестова

RJ2							RJ1					
GPS			<i>I</i>	<i>PWM</i>	<i>Lat.</i>	<i>Long.</i>	GPS			<i>Sila</i>	<i>Lat.</i>	<i>Long.</i>
<i>h</i>	<i>m</i>	<i>s</i>					<i>h</i>	<i>m</i>	<i>s</i>			
15	53	8.5	0.24	0.0025	43.3202677	21.9632315	15	53	8.5	79.86	43.3206030	21.9629997
15	53	8.6	0.22	0.0075	43.3202677	21.9632315	15	53	8.6	79.66	43.3206030	21.9629997
15	53	8.7	0.13	0.015	43.3202677	21.9632314	15	53	8.7	77.50	43.3206030	21.9629997
15	53	8.8	0.23	0.025	43.3202676	21.9632314	15	53	8.8	75.84	43.3206030	21.9629996
15	53	8.9	0.71	0.0325	43.3202676	21.9632314	15	53	8.9	75.73	43.3206030	21.9629996
15	53	9	1.39	0.04	43.3202676	21.9632314	15	53	9	74.14	43.3206029	21.9629995

ANN је креирана коришћењем софтверског пакета MATLAB (The Math Works, Inc. USA). Улазни слој ANN састоји се од 3 улазна неурона, у излазном слоју се налази један излазни неурон, док је приступ покушаја и грешке коришћен за одређивање

потребног броја скривених слојева као и броја неурона у овим слојевима. Најпре су креиране 4 вештачке мреже са једним скривеним слојем које су имале по 5, 10, 15 или 20 неурона у скривеном слоју. Код ових мрежа са једним скривеним слојем коефицијент корелације R је био у опсегу од 0.88 до 0.95, при чему је број итерација потребан за обуку ANN износи од 30 до 55. Након тога тестиране су мреже са два скривена слоја и три скривена слоја са променљивим бројем неурона по слојевима. Најбољи резултати су добијени када је ANN имала два скривена слоја од којих сваки има по 20 неурона и у складу са тим је усвојена коначна архитектура вештачке неуронске мреже, која је приказана на слици 9.18.

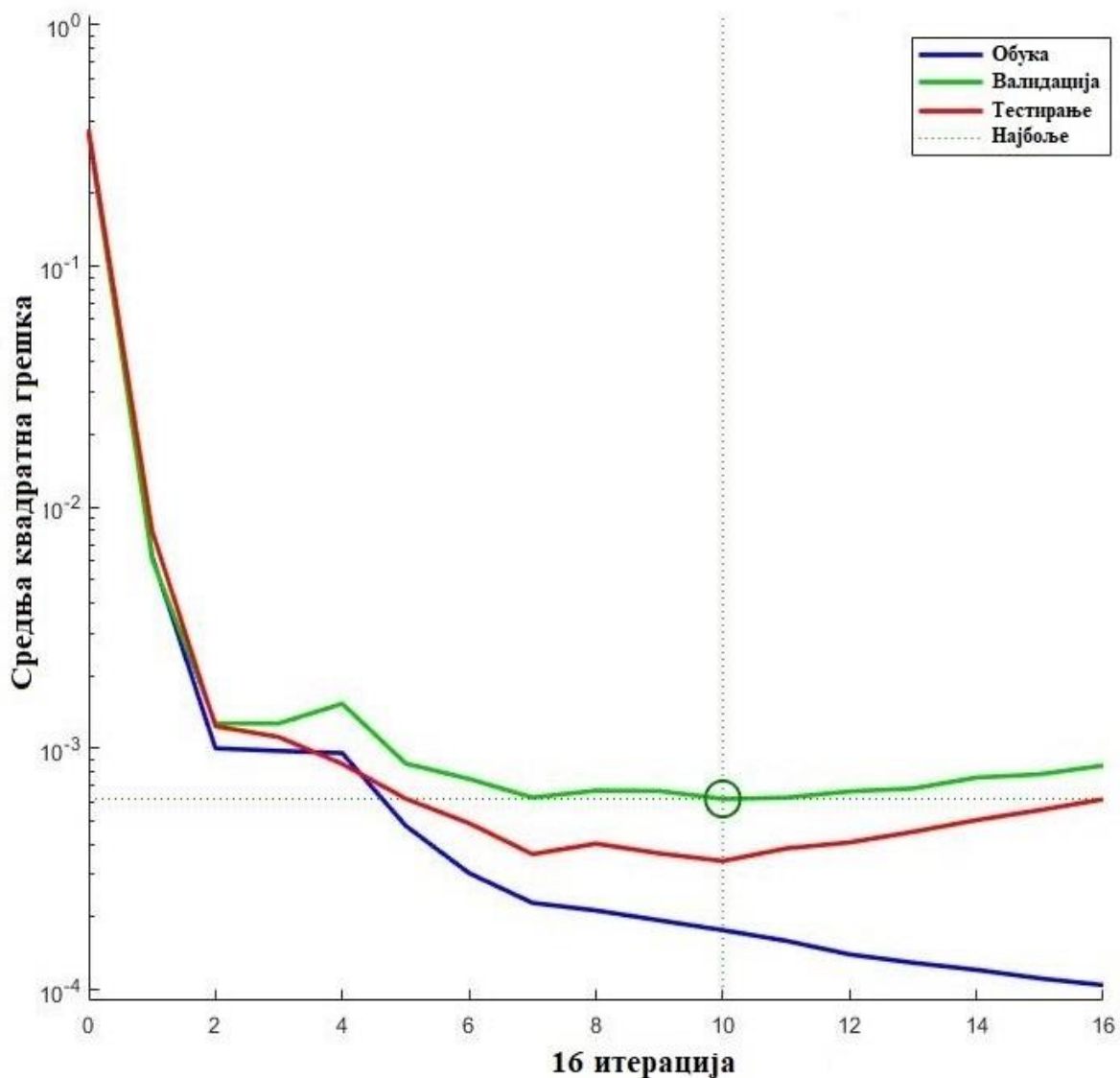


Слика 9.18 Вештачка неуронска мрежа са 3 улазне променљиве, 2 скривена слоја са по 20 неурона и једном излазном променљивом

ANN је обучена коришћењем Levenberg - Marquardt [148] алгоритма простирања уназад, због своје високе тачности и брзе конвергенције. Током обуке, за мерење перформанси коришћена је средња квадратна грешка. Скуп података састојао се од 4 сета променљивих где је свака променљива имала 523 податка.

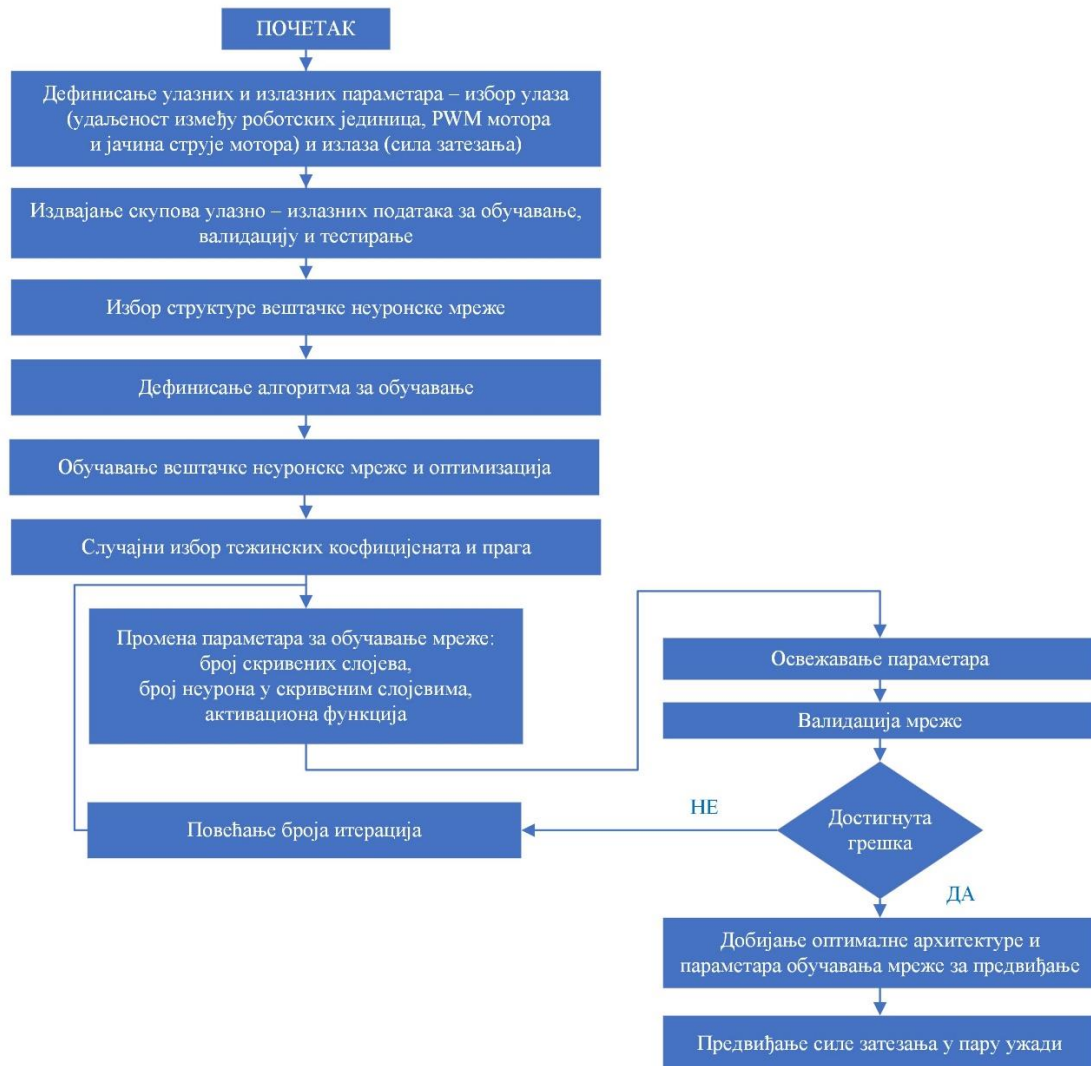
Ове променљиве су вредности PWM-а, удаљеност између роботских јединица, струја мотора и укупна сила у ужади. Да би се ове променљиве користиле у ANN, скуп

података је подељен у две матрице. Једна матрица се састојала од вредности PWM-а, удаљености и вредности струје мотора и названа је „улаз“. Друга матрица је имала вредности укупне силе у ужади и звала се „циљеви“. Када су матрице увезене у програм, насумично су одабрани скупови података за обуку, валидацију и тестирање за неуронску мрежу. Користећи податке из „улаза“ и „циљева“, ANN је рачунала „излазе“. Као узорак за обуку ANN коришћено је 4 сета са по 367 података. Мрежа је побољшавана у складу са грешкама које су се јављале током обучавања мреже. За мерење генерализације мреже коришћен је валидациони узорак који се састојао од 4 сета са по 78 података. Када је генерализација престала да се побољшава, обука мреже је заустављена. Током процеса обуке ANN, иако се очекивао већи број итерација, примећено је да је мањи број итерација био довољан за обуку ANN (слика 9.19).



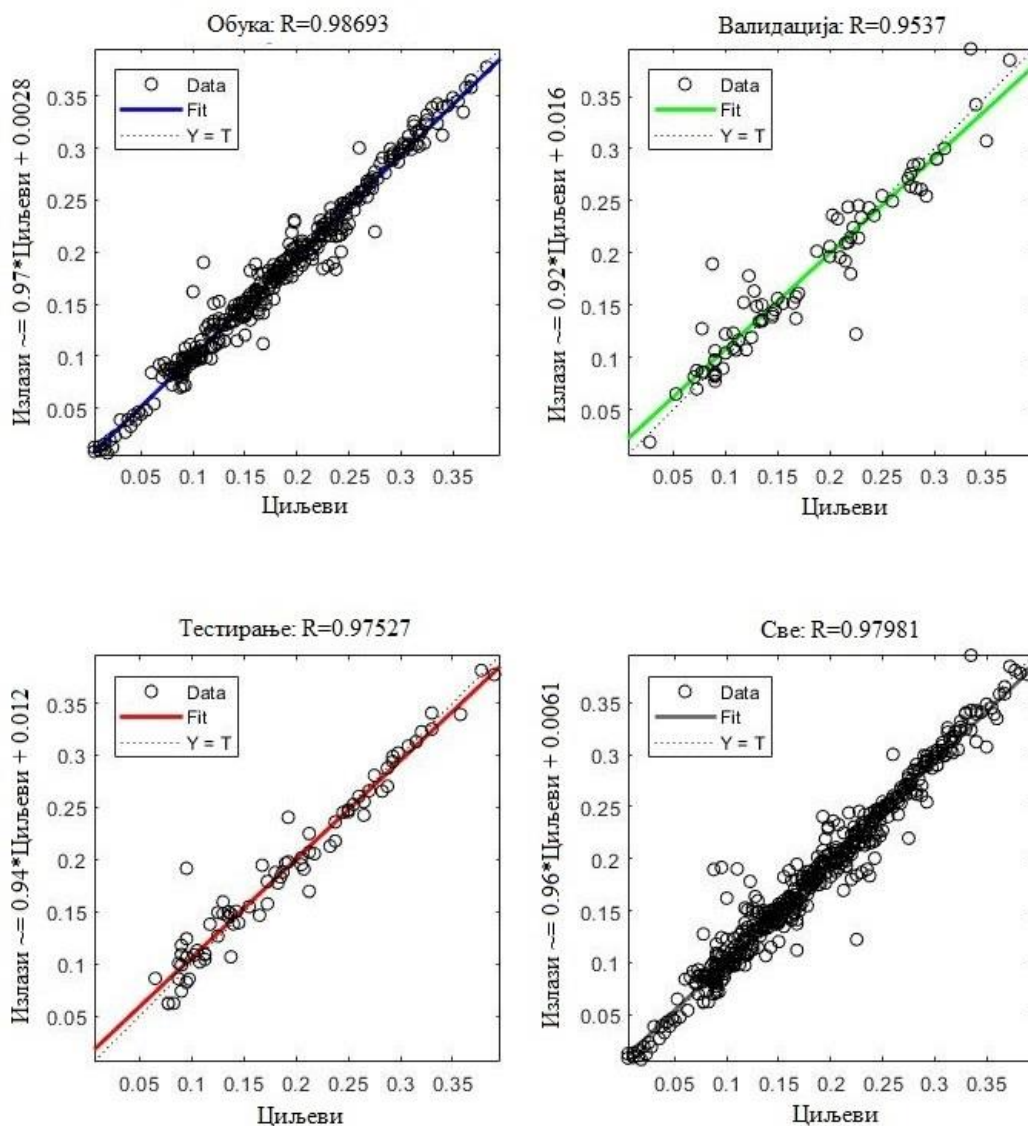
Слика 9.19 Средња квадратна грешка током процеса тренирања ANN

Дијаграм тока вештачке неуронске мреже за предвиђање силе затезања у пару ужади приказан је блок дијаграмом на слици 9.20.



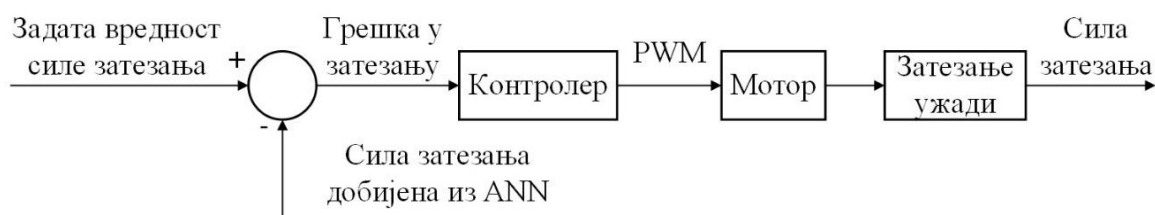
Слика 9.20 Дијаграм тока вештачке неуронске мреже

На крају, да би се провериле перформансе мреже, 4 сета са по 78 података је коришћено као независни узорак за тестирање. За мерење перформанси мреже коришћен је коефицијент корелације R , а добијени резултати су приказани на слици 9.21. Овај коефицијент показује колико је добро мрежа била обучена поређењем израчунатих „излаза“ са стварним „циљевима“. Већа вредност R значи боље перформансе мреже, при чему $R = 1$ одговара савршено подударним односима између „циљева“ и „излаза“. Током обуке вештачке неуронске мреже коефицијент корелације је био 0,98693 што значи да је мрежа била веома добро обучена. Обучена мрежа је тестирана на скупу података за тестирање где је R био 0,97527, док је укупна перформанса обучене ANN била 0,97981, што је препознато као веома задовољавајући резултат.



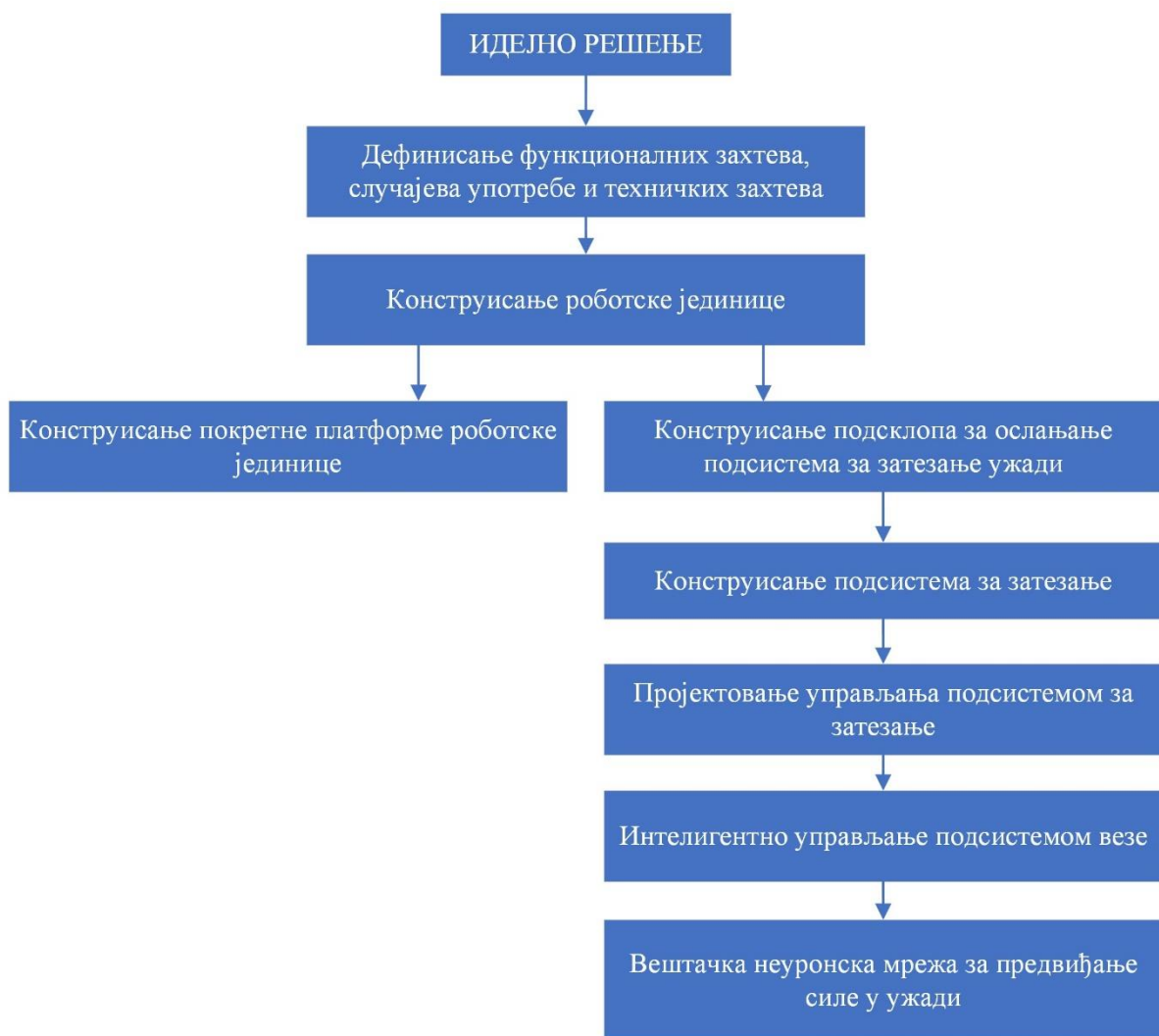
Слика 9.21 Резултати перформансе мреже за обуку, валидацију и тестирање

Имајући у виду добијене резултате, закључено је да се вештачка неуронска мрежа може користити за предвиђање силе у ужету са високом тачношћу. Стога је предложен нови управљачки алгоритам за подсистем затезања ужета где се сензор силе може заменити ANN-ом (слика 9.22). Имплементација и процена перформанси овог новог алгоритма управљања биће предмет даљих истраживања.



Слика 9.22 Предложено управљање подсистемом затезања ужета на бази ANN

На слици 9.23 је дат преглед фаза које су претходиле развоју интелигентног система управљања за предвиђање силе у ужади. Након почетног разматрања и прегледа стања технике усвојено је идејно решење система. На основу идејног решења је извршено конструисање роботских јединица, а након тога је урађен развој и имплементација подсистема везе између њих. При практичној реализацији прво је примењено класично управљање затезањем ужади између роботских јединица. Приликом тестирања подсистема за затезање ужади добијен је велики број података са одабраних сензора. На основу прикупљених података направљена је вештачка неуронска мрежа која може да врши предвиђање силе затезања ужади.



Слика 9.23 Развој интелигентног система управљања за предвиђање силе у ужади

10. Закључак

Потреба за одрживом производњом хране захтева стална истраживања и иновације у пољопривредном сектору. Посебно је видљив напредак у сектору сточарства где се током развоја и унапређења примењују различити видови аутоматизације како би се повећали капацитети, побољшала ефикасност током производње као и квалитет производа. Свакодневни изазови којима је изложено сточарство, попут недостатка радне снаге, управљања пашњацима, заштите животиња и други, а који утичу на функционисање овог сектора, све успешније се решавају применом иновативних решења кроз синергију индустрије и пољопривреде.

Кључни циљ и научни допринос ове докторске дисертације је анализа и развој интелигентних система везе између физички повезаних робота који су интегрисани у самоходни систем за испашу. Основни задатак развијеног система је управљање физичком везом између роботских јединица како би се омогућило формацијско управљање целог система. За решавање овог задатка развијен је подсистем за затезање ужета чија је главна функција одржавање оптималне силе затегнутости у ужету намотавањем или одмотавањем ужета. У циљу развоја поузданог интелигентног система везе спроведена су истраживања везана за машински развој као и за развој управљања подсистема за затезање ужета. У оквиру почетних истраживања је извршена анализа постојећих решења која се тренутно користе као помоћни или аутономни системи за испашу, као и истраживања везана за физички повезане роботе. Други део је била анализа конструкција различитих типова електричних ограда које се користе у пољопривреди. У складу са тим усвојено је решење које има за циљ развој самоходног система за испашу у виду роботског роја који има функцију покретне полигоналне електричне ограде која окружује сточне животиње у пољу или их приморава да се крећу дуж унапред дефинисане путање. Како би се добили релевантни подаци за развој овог система, на различитим локацијама је извршена анализа терена и услова експлоатације. За добијање одговарајућих података изабране локације су обухватале окружења са различитим рељефом и вегетацијом.

Резултат научног истраживања је и развој одређених подсистема роботских јединица од којих се самоходни систем састоји. На основу идејног решења урађен је развој компоненти које су битне за подсистем за затезање ужета. Након тога, кроз више итерација уз валидацију структурних компоненти, испитивања потребне силе затезања

ужета као и прорачуна против превртања роботске јединице, развијен је машински подсклоп подсистема за затезање ужета.

Резултат истраживања и научни допринос је и развијено интелигентно управљање подсистемом за затезање ужета. Првобитно развијено управљање базирано на класичном PI контролеру је током тестова показало одређене недостатке везане за одржавање одговарајуће затегнутости ужета. Решење за овај проблем пронађено је у примени савремених метода и алгоритама из домена вештачке интелигенције. На основу података добијених током тестова развијено је управљање на бази вештачких неуронских мрежа. Резултати научних истраживања омогућавају имплементацију новог алгорита за предвиђање силе у ужету у реалном времену.

У оквиру докторске дисертације представљени су следећи доприноси:

- Развијени подсклоп за ослањање подсистема за затезање ужета;
- Подсистем за затезање ужета који је интегрисан на роботске јединице;
- Развијено интелигентно управљање подсистемом за затезање ужета;
- Алгоритам за примену вештачких неуронских мрежа за управљање подсистемом за затезање ужета.

Поред тога формирана је база података која садржи податке са различитих сензора попут јачине струје мотора за затезање ужета, позиције робота, нагиба робота, силе затезања у ужету и сл.

У условима где се иновативна решења све више имплементирају у пољопривреду, развијени самоходни систем за испашу представљен у овој докторској дисертацији и његова примена, има значајан допринос у сточарству.

Правци даљих истраживања ће бити усмерени на оптимизацију управљања подсистемом за затезање ужета. То се посебно односи на побољшање развијене неуронске мреже кроз укључивање додатних података са сензора како би се побољшало предвиђање силе у ужету и унапредило управљање подсистема за затезање ужета, што има за циљ да омогући боље перформансе подсистема, дуже време експлоатације самоходног система за испашу као и заштиту склопова и подсклопова система. Један од праваца истраживања ће бити усмерен и на модификацију развијеног алгорита вештачке интелигенције како би се омогућила примена и у другим индустријским гранама где постоји потреба за одржавањем оптималног оптерећења физичке везе под утицајем променљивих фактора експлоатације.

Литература

- [1] K. Arts, R. van der Wal and W. M. Adams, "Digital technology and the conservation of nature," *A Journal of Environment and Society*, vol. 44, no. 4, p. s661–s673, 2015.
- [2] M. Fitzgerald, N. Kruschwitz, D. Bonnet and M. Welch, "Embracing Digital Tehnology," MIT Sloan Management Review, Cambridge, 2013.
- [3] M. van Dijk, T. Morley, M. L. Rau and Y. Saghai, "A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050," *Nature Food*, vol. 2, pp. 494-501, 2021.
- [4] I. L. Vorotnikov, N. V. Ukolova, S. V. Monakhov, J. A. Shikhanova and V. V. Neyfeld, "Economic Aspects Of The Development Of The "Digital Agriculture" System," *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, vol. 20, no. 1, pp. 633-638, 2020.
- [5] T. Qin, L. Wang, Y. Zhou, L. Guo, G. Jiang and L. Zhang, "Digital Technology-and-Services-Driven Sustainable Transformation of Agriculture: Cases of China and the EU," *Agriculture*, vol. 12, no. 297, pp. 1-16, 2022.
- [6] T. Xue-lan, D. Jian-nan and X. Yu-hang, "Development Strategy of Digital Agriculture in Hunan Province," in *Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, Shenzhen, 2011.
- [7] N. I. Sarker, S. Islam, A. Ali, S. Islam, A. Salam and H. Mahmud, "Promoting digital agriculture through big data for sustainable farm management," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 25, no. 4, pp. 1235-1240, 2019.
- [8] F. P. O'Mara, "The role of grasslands in food security and climate change," *Annals of Botany*, vol. 110, no. 6, pp. 1263-1270, 2012.
- [9] D. R. Kemp, H. Guodong, H. Xiangyang, D. L. Michalik, H. Fujiang, W. Jianping and Z. Yiangjun, "Innovative grassland management systems for environmental and livelihood benefits," *The Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110, no. 21, pp. 8369-8374, 2013.
- [10] G. P. Asner, A. J. Elmore, L. P. Olander, R. E. Martin and A. T. Harris, "Grazing Systems, Ecosystem Responses, and Global Change," *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 29, pp. 261-299, 2004.
- [11] P. Barbieri, B. Dumont, M. Benoit and T. Nesme, "Opinion paper: Livestock is at the heart of interacting levers to reduce feed-food competition in agroecological food systems," *Animal - The international journal of animal biosciences*, vol. 16, 2022.
- [12] C. Aquilani, A. Confessore, R. Bozzi, F. Sirtori and C. Pugliese, "Review: Precision Livestock Farming technologies in pasture-based livestock systems," *Animal - The international journal of animal biosciences*, vol. 16, 2022.

- [13] C. Umstatter, "The evolution of virtual fences: A review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 75, pp. 10-22, 2011.
- [14] R. Peck, „Method and apparatus for controlling an animal“. Патент US3753421, 1973.
- [15] H. Aine, „Wireless control of animals“. Патент US5121711, 1992.
- [16] P. K. Fay, V. T. McElligott, and K. Havstad, "Containment of free-ranging goats using pulsed-radio-wave-activated shock collars," *Applied Animal Science*, vol. 23, p. 165–171, 1989.
- [17] M. O. Monod, P. Faure, L. Moiroux and P. Rameau, "Stakeless fencing for mountain pastures.," in *4th European conference on precision livestock farming*, Wageningen, 2009.
- [18] L. D. Weinstein, „Electronic assembly for restricting animals to defined areas“. Патент US5067441, 1991.
- [19] D. M. Anderson и C. S. Hale, „Animal control system using global positioning and instrumental animal conditioning“. Патент US6232880B1, 2001.
- [20] A. F. Rose, "An alternative to fences," *Rangelands*, vol. 13, no. 3, p. 144–145, 1991.
- [21] [На мрежи] <https://www.nofence.no/en/blog>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [22] P. W. Brose, „Animal training and restraining system“. Патент US4898120, 1990.
- [23] D. M. Anderson, B. Nolen, E. Fredrickson, K. Havstad, C. Hale and P. Nayak, "Representing spatially explicit Directional Virtual Fencing (DVFTM) data," in *24th Annual ESRI International User Conference Proceedings*, San Diego, 2004.
- [24] [На мрежи] <https://am.gallagher.com/en/new-products/eShepherd>. [Последњи приступ јануар 2023.].
- [25] [На мрежи] <https://thestockcropper.com/>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [26] [На мрежи] <https://www.no-tillfarmer.com/articles/10794-autonomous-mobile-grazing-brings-biodiversity-back-to-the-land>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [27] [На мрежи] <https://twitter.com/zebulousprime?s=20>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [28] C. Yinka-Banjo and O. Ajayi, "Sky-Farmers: Applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Agriculture," *Autonomous Vehicles*, pp. 107-128, 2019.
- [29] J. Vayssade , R. Arquet and M. Bonneau , "Automatic activity tracking of goats using drone camera," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 162, pp. 767-772, 2019.
- [30] K. Havens and E. Sharp, *Thermal Imaging Techniques to Survey and Monitor Animals in the Wild*, Elsevier, 2015.
- [31] P. Chamoso , W. Raveane , V. Parra and A. González , "UAVs applied to the counting and monitoring," *J. (eds) Ambient Intelligence - Software and Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 291, pp. 71-80, 2014.

- [32] [На мрежи] <https://beefreeagro.com/>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [33] M. A. Alanezi, M. S. Shahriar, B. Hasan, S. Ahmed, Y. A. Sha'aban and H. R. E. H. Boucekara, "Livestock Management With Unmanned Aerial Vehicles: A Review," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 45001-45028, 2022.
- [34] [На мрежи] <https://research.tamu.edu/2019/03/07/drones-could-apply-thermal-imaging-to-identify-sick-livestock-in-feedlots/>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [35] P. Webb , S. A. Mehlhorn and P. Smartt , "Developing protocols for using a UAV to monitor herd," in *ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers - Annual International Meeting*, Spokane, 2017.
- [36] S. McDonnell and C. Torcivia , "Preliminary Proof of the Concept of Wild (Feral) Horses Following Light Aircraft into a Trap," *Animals (Basel)*, vol. 10, no. 1, 2020.
- [37] [На мрежи] <https://youtu.be/D8mXL2JapWM>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [38] [На мрежи] <https://www.ferntechcommercial.co.nz/agriculture>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [39] [На мрежи] <https://www.dailypost.co.uk/news/local-news/drone-sheep-flocks-farmers-sheepdog-17478918>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [40] M. S. Rutter, "Can precision farming technologies be applied to grazing management?," in *XXII International Grassland Congress*, Sydney, 2013.
- [41] [На мрежи] <https://www.lely.com/about-lely/our-company/history/>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [42] R. E. Diggs, „Rolling Electric Fence“. Патент US4078771A, 1978.
- [43] J. D. Bassett, „Robotic Rotational Grazing System“. Патент US2020138785A1, 2020.
- [44] A. Gautam and S. Mohan, "A review of research in multi-robot systems," in *IEEE 7th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, Chennai, 2012.
- [45] J. Cortes and M. Egerstedt, "Coordinated Control of Multi-Robot Systems: A Survey," *Journal of Control, Measurement, and System Integration*, vol. 10, no. 6, pp. 495-503, 2017.
- [46] T. Arai, E. Pagello and L. E. Parker, "Editorial: Advances in Multi-Robot Systems," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, pp. 665-661, 2002.
- [47] A. Farinelli, L. Iocchi and D. Nardi, "Multirobot Systems: A Classification Focused on Coordination," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part B: Cybernetics*, vol. 34, no. 5, pp. 2015-2028, 2004.
- [48] T. Balch and R. C. Arkin, "Behavior-Based Formation Control for Multirobot Teams," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 6, pp. 926-939, 1998.

- [49] E. Pagello, A. D'Angelo, F. Montesello, F. Garelli and C. Ferrari, "Cooperative behaviors in multi-robot systems through implicit communication," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 29, pp. 65-77, 1999.
- [50] Y. Ozkan-Aydin and D. I. Goldman, "Self-reconfigurable multilegged robot swarms collectively accomplish challenging terradynamic tasks," *Science Robotics*, vol. 6, no. 56, 2021.
- [51] R. O'Grady, R. Groß, A. L. Christensen and M. Dorigo, "Self-assembly strategies in a group of autonomous mobile robots," *Autonomous Robots*, vol. 28, pp. 439-455, 2010.
- [52] G. Baldassarre, S. Nolfi and D. Parisi, "Evolution of Collective Behavior in a Team of Physically Linked Robots," in *International conference on Applications of evolutionary computing*, 2003.
- [53] G. Baldassarre, V. Trianni, M. Bonani, F. Mondada and M. Dorigo, "Self-Organized Coordinated Motion in Groups of Physically Connected Robots," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part B: Cybernetics*, vol. 37, no. 1, pp. 224-239, 2007.
- [54] N. Lashkari, M. Biglarbegian and S. X. Yang, "Development of Novel Motion Planning and Controls for a Series of Physically Connected Robots in Dynamic Environments," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 95, p. 291–310, 2019.
- [55] Y. Ma, B. Jiang and V. Cocquempot, "Modeling and Adaptive Fault Compensation for Two Physically Linked 2WD Mobile Robots," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 26, no. 2, pp. 1161-1171, 2021.
- [56] D. A. Pereira, A. Al-Dujaili, M. E. B. El Najjar, V. Cocquempot and Y. Ma, "Actuator fault estimation and fault tolerant control in three physically-linked 2WD mobile robots," *International Federation on Automatic Control - PapersOnLine*, vol. 51, no. 24, pp. 709-716, 2018.
- [57] Z. Echegoyen, I. Villaverde, R. Moreno, M. Graña and A. d'Anjou, "Linked multi-component mobile robots: Modeling, simulation and control," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58, no. 12, p. 1292–1305, 2010.
- [58] G. Sprott, *Farming (Scotland's Past in Action)*, NMSE - Publishing Ltd, 1995.
- [59] I. G. McKillop and R. M. Sibly, "Animal behaviour at electric fences and the implications for management," *Mammal Review*, vol. 18, no. 2, pp. 91-103, 1988.
- [60] C. M. Mejdell, D. Basic and K. E. Bøe, "A review on the use of electric devices to modify animal behaviour and the impact on animal welfare," Norwegian Scientific Committee for Food and Environment, Oslo, 2017.
- [61] [На мрежи] <https://www.agrisellex.co.uk/blogs/blog/the-effective-earthing-system-of-an-electric-fence>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [62] [На мрежи] https://kencove.com/fence/23_Earth+%28Fence%29+Ground+Return+System_resource.php. [Последњи приступ јануар 2023].

- [63] [На мрежи] <https://store.jva-fence.com.au/blogs/blog-posts/benefits-of-bi-polar-electric-fencing>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [64] T. S. Smith, J. Gookin, B. G. Hopkins and S. H. Thompson, "Portable electric fencing for bear deterrence and conservation," *Human–Wildlife Interactions*, vol. 12, no. 3, p. 309–321, 2018.
- [65] N. B. Morgan, "The role of portable electric fencing in biodiversity-friendly pasture management," *Renewable Agriculture and Food Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 2-8, 2015.
- [66] [На мрежи] <https://www.proagri.co.za/sheep-farming-made-easy-part-16-fences/?lang=en>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [67] [На мрежи] <https://www.fencee.eu/en/m-175-electric-fence-conductors>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [68] T. Honda, "Height and tension of electric lines: how should an electric fence be installed to effectively mitigate human-wildlife conflict?," *European Journal of Wildlife Research*, vol. 68, no. 60, 2022.
- [69] [На мрежи] <https://www.gov.mb.ca/agriculture/livestock/production/beef/everything-you-need-to-know-about-electric-fencing.html>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [70] [На мрежи] <https://www.farmcareuk.com/blog/blog-15.html>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [71] [На мрежи] <https://www.bigredfencing.com.au/recommended-heights-and-spacings-for-electric-fence-wires/>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [72] T. Honda, "Are high-voltage electric fences more effective at deterrence than low-voltage fences? Interspecific differences," *Crop Protection*, vol. 148, 2021.
- [73] [На мрежи] <http://horizont-clair.si/paspri.htm>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [74] D. J. Thrimawithana, *A Novel Electric Fence Energizer: Design and Analysis*, Ph.D dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Auckland, 2008.
- [75] "International Standard IEC 60335-2-76," International Electrotechnical Commission, Geneva, 2002.
- [76] M. G. B. De Martino, F. S. dos Reis and G. A. D. Dias, "Study and implementation of an electric fence energizer," in *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Jeju, 2006.
- [77] [На мрежи] <https://us.speedrite.com/products/unigizers/12000i-unigizer>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [78] [На мрежи] <https://ahdb.org.uk/knowledge-library/components-of-an-electric-fence>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [79] [На мрежи] <https://clair.rs/konji/izolator-za-elektricnu-ogradu-oko-pasnjaka-koi-odabrati/>. [Последњи приступ јануар 2023].

- [80] [На мрежи] <https://ourworldindata.org/global-land-for-agriculture>. [Последњи приступ јануар 2023].
- [81] [На мрежи] https://www.hobbyprojects.com/projects/ball-on-plate-control.html?no_redirect=true. [Последњи приступ фебруар 2023].
- [82] [На мрежи] <http://edge.rit.edu/edge/P06003/public/images.html>. [Последњи приступ фебруар 2023].
- [83] D. Silva, J. Garrido and E. Riveiro, "Stewart Platform Motion Control Automation with Industrial Resources to Perform Cycloidal and Oceanic Wave Trajectories," *Machines*, vol. 10, no. 8, p. 711, 2022.
- [84] [На мрежи] <https://acrome.net/post/the-use-of-the-stewart-platform-in-real-life>. [Последњи приступ фебруар 2023].
- [85] M. Z. Fazal, S. Khan, , M. A. Abbas, Y. Nawab and S. Younis, "Machine learning approach for prediction of crimp in cotton woven fabrics," *Technical Gazette*, vol. 28, no. 1, pp. 88-95, 2021.
- [86] S.-H. Ham, M.-I. Roh, H. Lee and S. Ha, "Multibody dynamic analysis of a heavy load suspended by a floating crane with constraint-based wire rope," *Ocean Engineering*, vol. 109, pp. 145-160, 2015.
- [87] P. V. Kaurov , N. N. Kokushin and A. A. Tikhonov, "Mathematical modeling for paper stock drainage at hydrofoils of wire part of paper making machine," *International Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 2, no. 1, pp. 27-31, 2015.
- [88] L. Blanc, A. Delchambre and P. Lambert, "Flexible medical devices: Review of controllable stiffness solutions," *Actuators*, vol. 6, no. 3, pp. 1-31, 2017.
- [89] W. Shoubin and H. Fang, "Control technology and strategy of tension control system," in *Thirtieth Chinese Control and Decision Conference CCDC*, Shenyang, 2018.
- [90] L. Kevac and M. Filipović, "Mathematical model of cable winding/unwinding system," *Journal of Mechanics*, vol. 35, no. 1, p. 131–143, 2019.
- [91] L. Kevac, M. Filipović and A. Rakić, "Dynamics of the process of the rope winding (unwinding) on the winch," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 48, pp. 821-843, 2017.
- [92] N. Qie, W.-F. Houa and J.-H. He, "The fastest insight into the large amplitude vibration of a string," *Reports in Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 1-5, 2021.
- [93] K. Ji-Heon, K. Kun-Woo, L. Jae-Wook, C. Yong-Jae and J. Jin-Seok, "Development of a test method and experimental study on cable unwinding," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 235, no. 15, pp. 2653-2667, 2020.
- [94] X. Xiao-Ming, Z. Wu-Xiang, D. Xi-Lun, Z. Ming and W. Shi-Hou, "Design and analysis of a novel tension control method for winding machine," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 31, no. 1, p. 101, 2018.

- [95] A. Rodriguez, P. Vrancx, A. Nowe and E. Hostens, "Model-free learning of wire winding control," in *Ninth Asian Control Conference ASCC*, Istanbul, 2013.
- [96] J.-F. Collard, J. Lamaury and M. Gouttefarde, "Dynamics modelling of large suspended parallel cable-driven robots," in *European Community on Computational Methods in Applied Sciences ECCOMAS Thematic Conference Multibody Dynamics*, Brussels, 2011.
- [97] E. Hultman and M. Leijon, "Utilizing cable winding and industrial robots to facilitate the manufacturing of electric machines," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, no. 1, pp. 246-256, 2013.
- [98] H. Li, W. Liu, K. Wang, K. Kawashima and E. Magid, "A cable-pulley transmission mechanism for surgical robot with backdrivable capability," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 49, pp. 328-334, 2018.
- [99] P. Wen, C. Stapleton and Y. Li, "Tension control of a winding machine for rectangular coils," in *Tenth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision ICARCV*, Hanoi, 2008.
- [100] T. Imamura, T. Kuroiwa, K. Terashima and H. Takemoto, "Design and tension control of filament winding system," in *International Conference on Systems, Man and Cybernetics ICSMC*, Tokyo, 1999.
- [101] R. Sheng-le, L. Hua, W. Yong-zhang and F. Hong-ya, "Development of PLC-based tension control system," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 20, no. 3, pp. 266-271, 2007.
- [102] L. Jie-Shiou, C. Ming-Yang, S. Ke-Han and T. Mi-Chi, "Wire tension control of an automatic motor winding machine — an iterative learning sliding mode control approach," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 50, pp. 50-62, 2018.
- [103] N. R. Abjadi, J. Soltani, J. Askari and G. R. Arab Markadeh, "Nonlinear sliding-mode control of a multi-motor web-winding system without tension sensor," *IET Control Theory & Applications*, vol. 3, no. 4, pp. 419-427, 2009.
- [104] D. Knittel, E. Laroche, D. Gigan and H. Koc, "Tension control for winding systems with two-degrees-of-freedom H^∞ controllers," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 1, pp. 113-120, 2003.
- [105] C. Wang, Y. Wang, R. Yang and H. Lu, "Research on precision tension control system based on neural network," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 2, pp. 381-386, 2004.
- [106] Q. Zhang, S. Wang, A. Zhang, J. Zhou and Q. Liu, "Improved PI neural network-based tension control for stranded wire helical springs manufacturing," *Control Engineering Practice*, vol. 67, pp. 31-42, 2017.
- [107] F. J. Martin, M. V. Llopis, J. C. C. Rodriguez, J. R. B. Gonzalez and J. M. Blanco, "Low-cost open-source multifunction data acquisition system for accurate measurements," *Measurement*, vol. 55, pp. 265-271, 2014.

- [108] A. Z. Alkar and M. A. Karaca, "An internet-based interactive embedded data-acquisition system for real-time applications," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 3, pp. 522-529, 2009.
- [109] S. Choudhury, P. Kuchhal, R. Singh and G. Anita, "Zigbee and bluetooth network based sensory data acquisition system," *Procedia Computer Science*, vol. 48, pp. 367-372, 2015.
- [110] H.-f. Zhang and W. Kang, "Design of the data acquisition system based on STM32," *Procedia Computer Science*, vol. 17, pp. 222-228, 2013.
- [111] D. Peng, H. Zhang, K. Zhang, H. Li and F. Xia, "Research and development of the remote I/O data acquisition system based on embedded arm platform," in *International Conference on Electronic Computer Technology*, Macau, 2009.
- [112] D. Covaciu, I. Preda, G. Ciolan and O.-V. Campian, "Data acquisition system based on GPS technology, for vehicle dynamics analysis," in *International Automotive Congress CONAT*, Brasov, 2010.
- [113] B. H. Kim and T. Park, "Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 304, pp. 660-676, 2007.
- [114] W. Linjing and Z. Peijiang, "Real time monitoring system design of animal husbandry logistics based on arm and zigbee," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 539, pp. 874-877, 2014.
- [115] B. Wang and J. Qi, "Research on the intelligent cloud animal husbandry platform," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, pp. 1-10, 2022.
- [116] H. Rezk, I. Tyukhov, M. Al-Dhaifallah and A. Tikhonov, "Performance of data acquisition system for monitoring pv system parameters," *Measurement*, vol. 104, pp. 204-211, 2017.
- [117] F. Shariff, N. A. Rahim and H. W. Ping, "Zigbee-based data acquisition system for online monitoring of grid-connected photovoltaic system," *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 3, pp. 1730-1742, 2015.
- [118] S. Rosiek and F. J. Batlles, "A microcontroller-based data-acquisition system for meteorological station monitoring," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 12, pp. 3746-3754, 2008.
- [119] S. Ameer, M. Laghrouche and A. Adane, "Monitoring a greenhouse using a microcontroller-based meteorological dataacquisition system," *Renewable Energy*, vol. 24, no. 1, pp. 19-30, 2001.
- [120] M. Benganem, "Measurement of meteorological data based on wireless data acquisition system monitoring," *Applied Energy*, vol. 86, no. 12, pp. 2651-2660, 2009.
- [121] H. E. Gad and H. E. Gad, "Development of a new temperature data acquisition system for solar energy applications," *Renewable Energy*, vol. 74, pp. 337-343, 2015.
- [122] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Development of an integrated data-acquisition system for renewable energy sources systems monitoring," *Renewable Energy*, vol. 28, no. 1, pp. 139-152, 2003.

- [123] K. Kalaitzakis, E. Koutroulis and V. Vlachos, "Development of a data acquisition system for remote monitoring of renewable energy systems," *Measurement*, vol. 34, no. 2, pp. 75-83, 2003.
- [124] M. Karami, G. V. McMorrow and L. Wang, "Continuous monitoring of indoor environmental quality using an Arduino-based data acquisition system," *Journal of Building Engineering*, vol. 19, pp. 412-419, 2018.
- [125] M. A. De Georgia, F. Kaffashi, F. J. Jacono and K. A. Loparo, "Information technology in critical care: review of monitoring and data acquisition systems for patient care and research," *The Scientific World Journal*, vol. 2015, pp. 1-9, 2015.
- [126] R. E. Morley, E. J. Richter, J. W. Klaesner, K. S. Maluf and M. J. Mueller, "In-shoe multisensory data acquisition system," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 48, no. 7, pp. 815-820, 2001.
- [127] M. Rizk, C. A. Bosseti, T. A. Jochum, S. H. Callender, M. A. L. Nicoletis, D. A. Turner and P. D. Wolf, "A fully implantable 96-channel neural data acquisition system," *Journal of Neural Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 1-14, 2009.
- [128] V. Pavlović, M. Tomić, M. Milošević and L. Stojanović, "A Data Acquisition System for the Wire Tensioning System in the RoboShepherd," *Innovative Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 21-28, 2022.
- [129] Р. Глигорић, Машински елементи, Пољопривредни факултет, Универзитет у Новом Саду, 2015.
- [130] R. Bogue, "The role of artificial intelligence in robotics," *Industrial Robot*, vol. 41, no. 2, pp. 119-123, 2014.
- [131] Z. Nagy, *Artificial Intelligence and Machine Learning Fundamentals: Develop real-world applications powered by the latest AI advances*, Birmingham: Packt Publishing, 2018.
- [132] W. Wang and K. Siau, "Artificial Intelligence, Machine Learning, Automation, Robotics, Future of Work and Future of Humanity: A Review and Research Agenda," *Journal of Database Management*, vol. 30, no. 1, pp. 61-79, 2019.
- [133] G. Wisskirchen, B. T. Biacabe, U. Bormann, A. Muntz, G. Niehaus, G. J. Soler and B. von Brauchitsch, "Artificial Intelligence and Robotics and Their Impact on the Workplace," IBA Global Employment Institute, 2017.
- [134] V. R. Kumar and N. Mani, "The Application of Artificial Intelligence Techniques for Intelligent Control of Dynamical Physical Systems," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 8, pp. 379-392, 1994.
- [135] K. S. Narendra and S. Mukhopadhyay, "Intelligent Control Using Neural Networks," in *American Control Conference*, Boston, 1991.
- [136] K. Basye, T. Dean, J. Kirman and M. Lejter, "A decision-theoretic approach to planning, perception, and control," *IEEE Expert*, vol. 7, no. 4, pp. 58-65, 1992.

- [137] M. G. Rodd, H. B. Verbruggen and A. J. Krijgsman, "Artificial intelligence in real-time control," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 5, no. 5, pp. 385-399, 1992.
- [138] S. H. Alsamhi, O. Ma and M. S. Ansari, "Survey on artificial intelligence based techniques for emerging robotic," *Telecommunication Systems*, vol. 72, p. 483–503, 2019.
- [139] M. Raj and R. Seamans, "Primer on Artificial Intelligence and Robotics," *Journal of Organization Design*, vol. 8, no. 11, p. 2019, 2019.
- [140] [На мрежи] http://cent.mas.bg.ac.rs/nastava/ksivi_mo/Sajt%20SiVI%20i%20Metode%20odlucivanja/. [Последњи приступ април 2023].
- [141] С. Гавран, *Вештачке неуронске мреже у истраживању података: преглед и примена*, Мастер рад, Математички факултет, Универзитет у Београду, 2016.
- [142] [На мрежи] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neuron.svg>. [Последњи приступ април 2023].
- [143] A. Géron, *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*, 2nd Edition, O'Reilly Media, Inc., 2019.
- [144] W. S. McCulloch and W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity," *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, pp. 115-133, 1943.
- [145] Y.-c. Wu and J.-w. Feng, "Development and Application of Artificial Neural," *Wireless Personal Communications*, vol. 102, p. 1645–1656, 2018.
- [146] М. Б. Симоновић, *Примена вештачких неуронских мрежа за краткорочно предвиђање и анализу система даљинског грејања*, Докторска дисертација, Машински факултет, Универзитет у Нишу, 2016.
- [147] K. S. Narendra and S. Mukhopadhyay, "Intelligent control using neural networks," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 11-18, 1992.
- [148] V. Pavlović, M. Tomić, S.-D. Stan, M. Banić, M. Simonović and M. Milošević, "Control of Wire Tensioning System with Force Prediction Using Artificial Neural Network," *Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering*, p. Accepted for publishing.

Биографија

Вукашин Павловић је рођен 17. августа 1986. године у Нишу. Завршио је основну школу „Учитељ Таса” и гимназију „Бора Станковић”, обе у Нишу. Машински факултет у Нишу је уписао 2005. године. Мастер студије је завршио 2010. године на профилу Мехатроника са просечном оценом 9.84 у току студија и оценом 10 на мастер раду. У току студија је учествовао у реализацији неколико студентских пројеката.

Даље усавршавање наставио је уписом на докторске академске студије 2010. године на Машинском факултету у Нишу, у оквиру уже научне области Мехатроника. Од 2011. године ангажован је од стране Машинског факултета у Нишу на реализацији више научно-истраживачких пројеката и извођењу наставно-образовног процеса на катедри за Мехатронику и управљање, најпре као стипендиста Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије, а од 2017. године као асистент. Као асистент је учествовао у извођењу наставно-образовног процеса на више од 10 предмета.

Члан је организационог одбора неколико међународних научно-стручних конференција.

Аутор је и коаутор већег броја научних и стручних радова. Воли да скија и да игра шах. Ожењен је и живи у Нишу.

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

„Развој и управљање интелигентног система везе између физички повезаних робота“

која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 25.09.2023.

Потпис аутора дисертације:



Павловић Вукашин

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације:

**„Развој и управљање интелигентног система везе између физички повезаних
робота“**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

у Нишу, 25.09.2023.

Потпис аутора дисертације:



Павловић Вукашин

Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

„Развој и управљање интелигентног система везе између физички повезаних робота“

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)⁴

У Нишу, 25.09.2023.

Потпис аутора дисертације:



Павловић Вукашин

⁴ Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног
родитеља и име Павловић, Драган, Вукашин
Датум и место рођења 17. август 1986. године, Ниш

Основне студије

Универзитет Универзитет у Нишу
Факултет Машински факултет
Студијски програм Машинско инжењерство
Звање Мастер инжењер машинства – мехатроника
Година уписа 2005.
Година завршетка 2010.
Просечна оцена 9.84

Мастер студије, магистарске студије

Универзитет Универзитет у Нишу
Факултет Машински факултет
Студијски програм Машинско инжењерство
Звање Мастер инжењер машинства – мехатроника
Година уписа 2005.
Година завршетка 2010.
Просечна оцена 9.84
Научна област Машинско инжењерство
Наслов завршног рада Моделирање медицинских уређаја на примеру модела бесконачне траке

Докторске студије

Универзитет Универзитет у Нишу
Факултет Машински факултет
Студијски програм Машинско инжењерство
Година уписа 2010.
Остварен број ЕСПБ бодова 150
Просечна оцена 9,89

НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске дисертације Развој и управљање интелигентног система везе између физички повезаних робота.
Име и презиме ментора, звање др Милош Симоновић, ванредни професор
Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације НСВ број 8/20-01-004/23-023, 11.04.2023. године

ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна 135
Број поглавља 10
Број слика (шема, графикона) 91
Број табела 4
Број прилога -

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ

Примљено: 14-6-2023.			
Орг.јед.	Број	Прилог	Вредности
	612-80-80/23		

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1	<p>Vukašin Pavlović, Miša Tomić, Sergiu-Dan Stan, Milan Banić, Miloš Simonović, Miloš Milošević, Control of Wire Tensioning System with Force Prediction Using Artificial Neural Network, FACTA UNIVERSITATIS Series: Mechanical Engineering, прихваћен за објављивање – DOI 10.22190/FUME230218071P</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i> У овом раду је приказан развијени подсистем за затезање ужета који се користи код система роја роботских јединица које су физички повезани ужетом. Развијени подсистем има за циљ да у току кретања роботских јединица одржава задату ситу затезања у ужету намотавањем или одмотавањем самог ужета. На основу реалног сценарија кретања, традиционално управљање подсистемом за затезање ужета је искоришћено за прикупљање одређених података. Прикупљени подаци су даље искоришћени за развијање управљања на бази вештачке неуронске мреже.</p>	M21
2	<p>Vukašin Pavlović, Miša Tomić, Miloš Milošević, Lazar Stojanović, A Data Acquisition System for the Wire Tensioning System in the Roboshepherd, Inovative Mechanical Engineering, Vol. 1, N°3, 2022, pp. 21-28. http://ime.masfak.ni.ac.rs/index.php/IME/article/view/42</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i> У овом раду је приказан хардвер и софтвер рачунарски базираног система за аквизицију података за подсистем затезања ужета код физички повезаних роботских јединица. Развијени систем за аквизицију података се састоји од више сензора уз помоћ којих се мери сила у ужету, струја мотора који намотава или одмотава уже као и GPS-а уз помоћ ког се одређује позиција роботске јединице. На крају На рају рада су приказани дијаграми на основу података добијених током тестирања развијеног система за аквизицију у реалним условима.</p>	M54
3	<p>Vukašin Pavlović, Miša Tomić, Milan Banić, Miloš Simonović, Miloš Milošević, Design and Control of Wire Tensioning System Using Neural Network, Proceedings of the XV International Conference on Systems, Automatic Control and Measurements - SAUM 2021, Niš, 2021, pp. 98-101.</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i> У овом раду је описан развијени систем за затезање ужета који може да мери и контролише силу у ужету током процеса намотавања/одмотавања. На основу развијеног PI контролера и сензора силе прикупљени су различити подаци. Ови подаци су искоришћени за пројектовање неуронске мреже са циљем да се превазиђу недостаци традиционалног метода PI контроле. Развијени систем се користи код физички повезаних роботских возила ужетом уз помоћ којег се формира покретна ограда.</p>	M33

НАПОМЕНА: уколико је кандидат објавио више од 3 рада, додати нове редове у овај део документа

ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.

ДА
 НЕ

Кандидату је одобрена тема докторске дисертације. Докторска дисертација коју је кандидат предао је одговарајуће садржине, обима и квалитета у складу са одобреном темом. Кандидат је објавио већи број научних и стручних радова и испуњава услове за одбрану докторске дисертације.

ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације *(до 500 речи)*

Докторска дисертација се састоји из десет поглавља. На почетку дисертације је дат списак скраћеница, списак слика и табела. Након тога, у првом поглављу су дата уводна разматрања и представљени су предмет и циљ истраживања.

У другом поглављу је дат преглед истраживања из области примене аутономних система у пољопривреди, при чему је преглед усмерен на технологије прецизног сточарстава које се тренутно користе или развијају за потребе пољопривреде. Описани су различити роботизовани системи који се користе као помоћна средства у пољопривреди са посебним освртом на системе који служе за извођење домаћих животиња на испашу, за контролу њиховог кретања као и враћање животиња са испаше. У оквиру трећег поглавља је објашњен систем физички повезаних робота са посебним акцентом на групу код које постоји физичка веза између робота.

У четвртном поглављу је изложена примена концепта електричне ограде. У складу са тим, описани су различити типови електричних ограда које се користе у сточарству, а које служе за ограничавање кретања животиња. Објашњено је како се конструише електрична ограда, из којих делова се састоји и како се напаја. Такође, дат је и преглед више начина на које је могуће затворити струјно коло када животиња додирне ограду, као и преглед неопходне висине ограде према врсти животиње која се ограђује.

У петом поглављу је приказано идејно решење као и функционални захтеви потребни за развој интегрисаног система физички повезаних робота названог RoboShepherd. У оквиру овог поглавља су описани подсистеми од којих би требало да се састоји интегрисани систем физички повезаних робота.

Конструисање роботских јединица од којих се састоји интегрисани систем као и конструисање покретне платформе роботске јединице приказани су у шестом поглављу. Изложена је проблематика везана за нагиб и ротацију подскопа за ослањање подсистема за затезање физичке везе. На крају поглавља је приказан конструисан подскоп за ослањање подсистема за затезање физичке везе са саставним деловима и компонентама, као и начин спајања са покретном платформом.

У седмом поглављу је прво представљен подсистем физичке везе роботских јединица. У наставку је приказана развијена и реализована веза роботских јединица у виду подсистема за затезање ужета, са свим саставним компонентама. У оквиру овог поглавља је урађено и више испитивања која су везана за одређивање потребне силе затезања ужета, као и понашања ужета током експлоатације. Такође, приказан је систем за аквизицију података који је развијен за потребе система RoboShepherd. Осмо поглавље обухвата валидацију пројектованих склопова, подскопова и компоненти интегрисаног система, кроз анализе уз употребу методе коначних елемената.

У деветом поглављу су најпре изложене технике вештачке интелигенције и њихова употреба у роботизици. Посебни осврт је дат на примену вештачких неуронских мрежа. У наставку је приказано традиционално управљање подсистема за затезање ужета. На основу експерименталних података који су сакупљени кроз више различитих сценарија, пројектовано је интелигентно управљање на бази вештачке неуронске мреже. У десетом поглављу су дата закључна разматрања, сумирани резултати истраживања и предложени даљи правци истраживања.

На крају докторске дисертације је дат списак коришћене литературе као и биографија аутора.

ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације (до 200 речи)

Циљеви истраживања који су постављени у пријави докторске дисертације су остварени, у складу са предложеним оквирним садржајем дисертације.

Истраживања која су представљена у докторској дисертацији обухватају више научноистраживачких праваца везаних за прикупљање података за развој подсистема за затезање физичке везе, развој и реализацију подскопа за ослањање подсистема за затезање физичке везе, сам развој и реализацију подсистема за затезање физичке везе, експериментално тестирање система физички повезаних робота уз селекцију кључних параметара који утичу на формацијско управљање целим системом као и њихову анализу и праћење у току експлоатације, развој традиционалног и интелигентног управљања подсистемом за затезање ужета на бази вештачких неуронских мрежа а на основу добијених података из експерименталних испитивања. Резултати истраживања који су представљени у докторској дисертацији потврђују да се развијени подсистеми могу користити у оквиру система RoboShepherd. Такође, резултати истраживања показују да се развијено интелигентно управљање подсистема за затезање физичке везе на бази неуронске мреже може користити за предикцију силе затегнутости у ужету.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације (до 200 речи)

Тема коју обрађује докторска дисертација је због све веће примене дигиталних технологија у различитим секторима, посебно када се узму у увид дигиталне технологије које доносе иновације у пољопривредном сектору као и константна потреба развоја сектора производње хране, веома актуелна и значајна у научном смислу, те представља оригиналан и вредан научни и стручни допринос кандидата. Научни доприноси докторске дисертације су:

- Развијен подсистем за затезање физичке везе између роботских јединица;
- Извршена селекција кључних параметара који утичу на формацијско управљање целог система;
- Развијено интелигентно управљање подсистемом за затезање ужета на бази вештачких неуронских мрежа;
- Извршено експериментално тестирање целог система кроз више реалних сценарија како би се утврдила примењивост у реалним условима.

Имајући у виду резултате спроведених истраживања, може се закључити да је развијени подсистем за затезање физичке везе директно применљив као интегрална целина у оквиру интегрисаног система физички повезаних робота.

Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)

У току научно-истраживачког рада кандидат је показао да поседује висок ниво самосталности, инвентивности и систематичности. Кроз способност сагледавања са више страна и свеобухватне анализе долази до решења различитих проблема истраживања на оригиналан и креативан начин.

Кроз истраживања и резултате се може закључити да кандидат поседује адекватна теоријска и практична знања из различитих области која су потребна за израду докторске дисертације.

Неки од научних резултата, који су представљени у докторској дисертацији, су приказани у оквиру научних радова, који су објављени у научним часописима и зборницима међународних конференција.

ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)

На основу свега изложеног, имајући у виду остварене научне резултате кандидата, значај као и актуелност обрађене теме, чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације закључују да поднета докторска дисертација представља оригиналан и вредан научни и стручни допринос и са задовољством предлажу Наставно-научном већу Машинског факултета у Нишу да поднети рад кандидата Вукашина Павловића, мастер инжењера машинства, под називом:

„Развој и управљање интелигентног система везе између физички повезаних робота”

прихвати као докторску дисертацију, а кандидата позове на усмену јавну одбрану.

КОМИСИЈА

Р. бр.	Име и презиме, звање	Потпис
1.	др Милош Симоновић, ванредни професор Аутоматско управљање и роботика (Ужа научна област)	председник Универзитет у Нишу Машински факултет (Установа у којој је запослен)
2.	др Милош Милошевић, редовни професор Мехатроника (Ужа научна област)	члан Универзитет у Нишу Машински факултет (Установа у којој је запослен)
3.	др Милан Банић, ванредни професор Машинске конструкције (Ужа научна област)	члан Универзитет у Нишу Машински факултет (Установа у којој је запослен)
4.	др Александра Цветковић, доцент Мехатроника (Ужа научна област)	члан Универзитет у Нишу Машински факултет (Установа у којој је запослен)
5.	др Стеван Станковски, редовни професор Мехатроника, роботика и аутоматизација и интегрисани системи (Ужа научна област)	члан Универзитет у Новом Саду Факултет техничких наука (Установа у којој је запослен)

Датум и место:

Јун 2023, Нови Сад, Ниш