



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ



Недељко Г. Дучић

**ИНТЕЛИГЕНТНО УПРАВЉАЊЕ,
МОДЕЛИРАЊЕ И ОПТИМИЗАЦИЈА
ПРОЦЕСА ЛИВЕЊА**

Докторска дисертација

Ниш, 2017.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



Nedeljko G. Dučić

**INTELLIGENT CONTROL, MODELING AND
OPTIMIZATION OF THE CASTING
PROCESS**

Doctoral dissertation

Niš, 2017.

*“Ако планираш за годину унапред, посеј тиринач;
ако планираш за деценију, посади дрво;
планираш ли за столеће унапред, образуј човека.”*
Чуанг Це - 莊子

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	др Жарко Ђојбашић, редовни професор, Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу.
Наслов:	Интелигентно управљање, моделирање и оптимизација процеса ливења.
Резиме:	<p>У оквиру докторске дисертације представљен је развој управљања, моделирање и оптимизација процеса ливења заснована на примени метода вештачке односно рачунарске интелигенције. Унапређење производних процеса у ливницама, у оквиру истраживања обухваћених докторском дисертацијом, обухвата моделирање процеса топљења метала, оптимизацију система ливења у песку и управљање процесом гравитационог ливења.</p> <p>Први део истраживања бави се моделирањем топљења метала у пећима, који је процес сложене природе због динамике нелинеарних хемијских реакција. Конвенционални математички и термодинамички модели, који су свакако од помоћи, нису у потпуности поуздани због сложене интеракције процесних варијабли. Неуронске мреже, као једна од кључних техника рачунарске интелигенције, у стању су да идентификују унутрашње односе кроз обучавање. Као такве користе се као ефикасан алат у дефинисању жељеног хемијског састава истопљеног метала омогућујући унапређење процеса легирања.</p> <p>Правилно и потпуно попуњавање калуца представља важан задатак код процеса ливења, којим се постиже висок квалитет одливка. Улога дизајна уливног система и дизајна хранитеља у остварењу овог циља веома је значајна. Неправилан дизајн уливног система доводи до бројних недостатака у процесу ливења, што за последицу има низак квалитет одливка. Дакле, задатак уливног система је да обезбеди глатко, уједначено и потпуно пуњење калуца чистим, истопљеним металом. Глатко пуњење елиминира турбуленције, уједначено пуњење обезбеђује континуирано пуњење у току времена, а потпуно пуњење подразумева вођење истопљеног метала до танких и крајњих делова калуца. Током хлађења одливка долази до запреминског скупљања метала, тј. смањења запремине одливка. Значај хранитеља огледа се у њиховој функцији да надокнађују одливку мањак течног метала услед запреминског скупљања. Други део истраживања је оптимално конструисање уливног система и хранитеља који задовољавају захтев за високим квалитетом одливка и уштедом материјала. Комбинација метода глобалне оптимизације и <i>CAD/CAM</i> софтвера обезбедила је могућност ефикасне оптимизације, дизајна и верификације оптималног решења нумеричком симулацијом.</p>

	<p>За разлику од неких других индустријских процеса, многе ливнице нису имале користи од напредне аутоматизације, те се процес пуњења калупа још увек углавном одвија ручно. Аутоматизовани системи који минимизују учешће радника и повећавају прецизност ливења, такође представљају предмет истраживања у оквиру докторске дисертације. Део истраживања посвећен развоју управљања процесом ливења обухвата предлог управљања погоном, развој лабораторијског симулатора ливења и разраду могућности примене интелигентног управљања пуњењем калупа.</p>
Кључне речи:	Топљење метала, Ливење, Моделирање, Оптимизација, Управљање, Нумеричка симулација, Лабораторијски симулатор, Неуро мреже, Генетски алгоритми, Оптимизација ројем честица, Фази логика, Неуро-фази системи.
Научно поље:	Техничко-технолошке науке
Научна област:	Машинско инжењерство
Ужа научна област:	Мехатроника и управљање
УДК:	007.52:[669.046+621.74(043.3) 004.8+004.032.26]:621.74(043.3)
CERIF класификација:	T125 и T130.
Тип лиценце креативне заједнице:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	PhD Žarko Čojbašić, Full time professor, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering.
Title:	Intelligent control, modeling and optimization of the casting process.
Abstract:	<p>In the framework of the doctoral dissertation, it is presented a development of control, modeling and optimization of the casting process, based on application of artificial i.e. computational intelligence methods. Improving of production processes in foundries, in the framework of researches that contains doctoral dissertation consist of modeling of metal melting process, optimization of sand casting system and control of gravity casting process.</p> <p>The first part of research deals with modeling of melting metal in furnaces. It is a complex process due to dynamics of non-linear chemical reactions. Conventional mathematical and thermodynamical models, which are certainly helpful, are not fully reliable due to complex interactions of process variables. Neural networks, as one of the key techniques of computational intelligence, are able to identify internal relationships through training examples. As such, they are used as an effective tool in defining the needed chemical composition of the molten metal by providing alloying process improvement.</p> <p>Proper and complete mold filling is the main objective of the sand casting process, which ensures high quality of the casting part. To this end, the designs of the gating system and feeding system is of major importance, as improper designing of the system results in a number of defects in the casting process, e.g. low quality of the casting part. Therefore, the gating system aims at providing a smooth, uniform and complete filling of the mold with pure, molten metal. Smooth filling eliminates turbulence, uniform filling ensures continuous mold filling, whereas complete filling allows the molten metal to reach minor, end cavities of the mold. During cooling casting part comes to the volume metal shrinkage, ie. reducing the volume of casting part. The importance of feeders is in their function to compensate the lack of molten metal in the casting part due to volume shrinkage. The second part of research is an optimal construction of gating system and feeders, which satisfy the requirements with high quality casting part and savings of materials. The combination of global optimization method and CAD/CAM software has provided the possibility of effective optimization, design and verification of optimal solutions by numerical simulation.</p> <p>Unlike some other industrial processes, many casting plants have not benefited from the advanced automation therefore the process of filling the mold cavity is still manually performed. Automated systems that minimize the participation of workers</p>

	and enhance the precision of casting, are also the subject of research in this doctoral dissertation. The part of research, which is dedicated to the development of casting process control, contains a proposal of an automated system in casting plants, development of laboratory simulator of the casting process and the development of possibility of application of intelligent control of mold filling.
Key words:	Metal melting, Casting, Modeling, Optimization, Control, Numerical simulation, Laboratory simulator, Neural networks, Genetic algorithms, Particle swarm optimization, Fuzzy logic, Neuro-fuzzy systems.
Scientific field:	Technical-technological sciences.
Scientific area:	Mechanical Engineering.
Field of Academic Expertise:	Mechatronics and control.
UDK:	007.52:[669.046+621.74(043.3) 004.8+004.032.26]:621.74(043.3)
CERIF Classification:	T125 and T130.
Creative Commons License Type :	CC BY-NC-ND

Захвалност аутора

Овај рад је производ подршке, искрених смерница и охрабрења неколико особа.

Пре свега, желим да се захвалим ментору рада проф. др Жарку Ђојбашићу, на указаном поверењу и прилици да урадим докторат под његовим надзором. Веома сам му захвалан за сав уложени труд и посвећеност, континуирану мотивацију, искрену подршку и одличне смернице током читавог периодаведеног на докторским студијама.

Искрену захвалност упућујем проф. др Радомиру Славковићу за сваку врсту подршке и помоћи, и искрен пријатељски однос.

Такође, изражавам захвалност колегама Срећку Манасијевићу и Радомиру Радиши из Лола института на помоћи и саветима током мог истраживачког рада, Индустијском комбинату – Гуча у чијој ливници су реализована истраживања, као и Факултету техничких наука у Чачку на финансијској помоћи.

Искрена захвалност и поштовање за моје родитеље и сестру, који су веровали у мене.

Захваљујем се мојој дивној супрузи Невени за љубав, подршку и поднету жртву током моје посвећености истраживању и раду на писању дисертације.

Захваљујем се мојим пријатељима, драгим људима, чији је списак, срећом, дугачак па их нећу набрајати.

Недељко Дучић,

Ниш, 2017.

С А Д Р Ж А Ј

Листа слика и табела.....	i
1. УВОД	1
1.1. ПРОЦЕС ЛИВЕЊА И РАЧУНАРСКА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА	2
1.2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ.....	8
1.3. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА И ЦИЉЕВИ	12
1.4. ПРИМЕЊЕНЕ НАУЧНЕ МЕТОДЕ.....	15
2. ТЕХНИКЕ РАЧУНАРСКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ	17
2.1. ВЕШТАЧКЕ НЕУРОНСКЕ МРЕЖЕ	17
2.1.1. Вишеслојни перцептрон (Multilayer perceptron – MLP)	21
2.1.2. Мрежа радијалних базисних функција (Radial Basis Function – RBF).....	25
2.2. МЕТОДЕ ГЛОБАЛНЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ	29
2.2.1. Генетски алгоритми	29
2.2.2. Оптимизација ројем честица	34
2.3. ФАЗИ СИСТЕМИ	36
2.4. НЕУРО – ФАЗИ СИСТЕМИ – <i>ANFIS</i>	41
3. МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ТОПЉЕЊА МЕТАЛА	44
3.1. ОПИС ПРОЦЕСА И ЊЕГОВИ ФИЗИЧКИ ФЕНОМЕНИ.....	44
3.2. ПРИМЕНА НЕУРОНСКИХ МРЕЖА У ПРОИЗВОДЊИ БЕЛОГ ЛИВЕНОГ ГВОЖЂА.....	47
3.2.1. Поставка експеримента.....	48
3.2.2. Моделирање процеса добијања белог ливеног гвожђа.....	51
3.3. РАЗВОЈ ИНТЕЛИГЕНТНОГ НЕУРО–ГЕНЕТСКОГ СОФТ СЕНЗОРА ЗА ИНТЕГРАЦИЈУ ДВА ПРОИЗВОДНА ПРОЦЕСА	53
3.3.1. Моделирање процеса флотације руде	54
3.3.2. Оптимизација процеса флотације руде	58
3.3.3. Развој интелигентног софт сензора	59
4. ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА ЛИВЕЊА У ПЕСКУ	63
4.1. ЛИВЕЊЕ У ПЕСКУ	64
4.2. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ РЕШЕЊА УЛИВНОГ СИСТЕМА.....	67
4.2.1. Уливна чаша	68
4.2.2. Спроводник.....	69

4.2.3. Колектор.....	70
4.2.4. Разводник	71
4.2.5. Уливник.....	72
4.3. ДЕФЕКТИ У ПРОЦЕСУ ЛИВЕЊА	72
4.4. МЕТАХЕУРИСТИЧКА ОПТИМИЗАЦИЈА УЛИВНОГ СИСТЕМА.....	74
4.4.1. Дефинисање функције циља	74
4.4.2. Дефинисање ограничења	78
4.4.3. Оптимизациони процеси и њихова решења	80
4.5. ОЧВРШЋАВАЊЕ И ХРАЊЕЊЕ ОДЛИВКА	82
4.6. МЕТАХЕУРИСТИЧКА ОПТИМИЗАЦИЈА ХРАНИТЕЉА	85
4.6.1. Дефинисање функције циља	87
4.6.2. Дефинисање ограничења	88
4.6.3. Оптимизациони процеси и њихова решења	89
4.7. НУМЕРИЧКА СИМУЛАЦИЈА ПРОЦЕСА ЛИВЕЊА	91
5. ИНТЕЛИГЕНТНО УПРАВЉАЊЕ ПРОЦЕСОМ ЛИВЕЊА	97
5.1. ПРЕДЛОГ АУТОМАТИЗОВАНОГ СИСТЕМА.....	98
5.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ЛАБОРАТОРИЈСКО ПОСТРОЈЕЊЕ.....	99
5.2.1. Симулатор ливења.....	100
5.2.2. Симулациони модел калупа и сензорска техника.....	108
5.2.3. Управљачке компоненте.....	111
5.3. ФАЗИ И НЕУРО ФАЗИ УПРАВЉАЊЕ ПРОЦЕСОМ ЛИВЕЊА	122
5.3.1. Пројектовање фази и неуро фази регулатора	123
5.3.2. Имплементација фази и неуро фази регулатора у управљачки систем	130
6. ЗАКЉУЧАК	139
6.1. ДИСКУСИЈА И ЗАКЉУЧЦИ.....	139
6.2. ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА	142
6.3. ПРЕГЛЕД ОРГИНАЛНИХ ДОПРИНОСА.....	142
ЛИТЕРАТУРА	144
БИОГРАФИЈА АУТОРА.....	154

Листа слика и табела

- Слика 1.1.** Подела технолошких поступака ливења према уливној сили и врсти калупа и модела (Страна 4)
- Слика 2.1.** Шематски приказ биолошког неурона (Страна 18)
- Слика 2.2.** Модел вештачког неурона (Страна 19)
- Слика 2.3.** Једнослојна нерекурентна мрежа (Страна 19)
- Слика 2.4.** Једнослојна рекурентна мрежа (Страна 20)
- Слика 2.5.** Активационе функције а) линеарна, б) одскачна, в) делимично линеарна и г) сигмоидна (Страна 21)
- Слика 2.6.** Вишеслојни перцептрон (Страна 22)
- Слика 2.7.** Модел *RBF* вештачке неуронске мреже (Страна 25)
- Слика 2.8.** Принцип укрштања (Страна 33)
- Слика 2.9.** Принцип мутације (Страна 33)
- Слика 2.10.** а) троугаона, б) трапезна и в) Гаусова функција припадности (Страна 38)
- Слика 2.11.** Основна структура фази контролера (Страна 39)
- Слика 2.12.** Методе дефазификације (Страна 40)
- Слика 2.13.** Архитектура *ANFIS* – а (Страна 41)
- Слика 3.1.** Приказ попречног пресека лончасте индукционе пећи (Страна 45)
- Слика 3.2.** Приказ попречног пресека каналне индукционе пећи (Страна 46)
- Слика 3.3.** Сипање истопљеног гвожђа из пећи у лонац за транспорт (Страна 48)
- Слика 3.4.** Приказ спектрохемијског уређаја и место постављања узорка за анализу (Страна 49)
- Слика 3.5.** Хемијски састав (C, Cr, Si, Mn) две и по тоне гвожђа у пећи (Страна 49)

Слика 3.6. Хемијски састав (C, Cr, Si, Mn) челичног отпада (Страна 50)

Слика 3.7. Маса чистих легирајућих елемената (C, Cr, Si, Mn) додата у процесу легирања (Страна 50)

Слика 3.8. Коначан хемијски састав (C, Cr, Si, Mn) након легирања (Страна 51)

Слика 3.9. Архитектура мреже (ВНМ 12–16–12–4) са најбољим перформансама (Страна 52)

Слика 3.10. Упоредна анализа резултата добијених мерењем и предикцијом употребом ВНМ 12–16–12–4 (Страна 53)

Слика 3.11. Приказ вештачког неурона и модела ВНМ 5 – 5 – 1 (Страна 56)

Слика 3.12. Предикција нивоа хабања различитим архитектурама ВНМ (Страна 56)

Слика 3.13. Поређење мерених и ВНМ вредности нивоа хабања кугли (Страна 57)

Слика 3.14. Алгоритам оптимизационог процеса (Страна 58)

Слика 3.15. Минимизација хабања флотацијских кугли кроз генерације (Страна 59)

Слика 3.16. Вредности оптимизованих величина (Страна 59)

Слика 3.17. Одступање од референтног хемијског састава (Страна 60)

Слика 3.18. Архитектура ВНМ 12–16–12–4 (Страна 61)

Слика 3.19. Поређење резултата добијених мерењем и предикцијом за манган и силицијум (Страна 62)

Слика 3.20. Поређење резултата добијених мерењем и предикцијом за угљеник и хром (Страна 62)

Слика 4.1. Резни зуб, носач зуба и ведрица (Страна 67)

Слика 4.2. Уливни систем за ливење носача зуба (Страна 68)

Слика 4.3. Приказ купасте чаше у комбинацији са спроводником: а) најмање штетно решење, б) превелика чаша, в) заобљена чаша, г) премала чаша и д) увећан спроводник који обједињује и чашу (Страна 68)

Слика 4.4. Коритасте чаше: а) без бране (дефинитивно се не препоручује), б) оштра брана (не препоручује се) и в) заобљена брана (препоручује се) (Страна 69)

Слика 4.5. Геометрија слободног пада лива из чаше, и приказа спроводника који је пртрпео велику штету увлачењем ваздуха, као и приказ спроводника без оштећења (Страна 70)

Слика 4.6. Колектор са одговарајућим геометријским величинама (Страна 71)

Слика 4.7. а) Небалансирана испорука истопљеног метала као последица лошег дизајна разводника, б) балансирана испорука истопљеног метала (Страна 71)

Слика 4.8. Непотпуно ливење (лево) и хладни вар (десно) (Страна 73)

Слика 4.9. Попречни пресек одливка $A_1(52mm) = 78041.27mm^2$ (Страна 75)

- Слика 4.10.** Графички приказ функције $A_i(0-21)$ (Страна 76)
- Слика 4.11.** Графички приказ функције $A_i(21-60)$ (Страна 76)
- Слика 4.12.** Графички приказ функције $A_i(60-90)$ (Страна 77)
- Слика 4.13.** Домен претраге дефинисан првим ограничењем (Страна 78)
- Слика 4.14.** Домен претраге дефинисан другим ограничењем (Страна 79)
- Слика 4.15.** Резултати оптимизације генетским алгоритмом (Страна 80)
- Слика 4.16.** Оптимизација ројем честица (Страна 81)
- Слика 4.17.** Шематски приказ три форме скупљања: у течној фази, фази очвршћавања и чврстој фази (Страна 83)
- Слика 4.18.** Отворени и затворени дефекти као последица скупљања метала (Страна 84)
- Слика 4.19.** Позиционирање система храњења а) хранитељ на одливку и б) бочни хранитељ (Страна 85)
- Слика 4.20.** Симетрични цилиндрични хранитељи и њихово дејство исхране одливка (Страна 86)
- Слика 4.21.** Предложени уливни систем са хранитељима (Страна 87)
- Слика 4.22.** CAD модели система ливења са хранитељима и језгра (Страна 90)
- Слика 4.23.** Коефицијент прелаза топлоте за пар челик - слој премаза (Страна 92)
- Слика 4.24.** Карактеристике материјала а) специфични топлотни капацитет и б) топлотна проводљивост (Страна 92)
- Слика 4.25.** Време пуњења калуца и брзина ливења (Страна 93)
- Слика 4.26.** Температурно поље на крају пуњења (Страна 94)
- Слика 4.27.** FEEDMOD критеријум (Страна 94)
- Слика 4.28.** Време протекло од ликвидус до солидус температуре (Страна 95)
- Слика 4.29.** Критеријум HOT SPOT (Страна 95)
- Слика 4.30.** Критеријум POROSITY (Страна 96)
- Слика 4.31.** Носач зуба, монтажа, кашика багера (Страна 96)
- Слика 5.1.** Ручно управљање производним процесом гравитационог ливења (Страна 97)
- Слика 5.2.** Предложени аутоматизовани систем у погону: а) сипање истопљеног метала у лонац из пећи и б) прецизно сипање истопљеног метала у калуп (Страна 98)
- Слика 5.3.** Сензорска техника на линији за ливење и приказ калуца (Страна 99)
- Слика 5.4.** CAD модел лабораторијског симулатора ливења (Страна 100)
- Слика 5.5.** Компоненте погонске јединица за ротационо кретање (AC серво мотор и редуктор) (Страна 101)

- Слика 5.6.** Димензионе карактеристике пужног редуктора *СНМ301056В14* (Страна 102)
- Слика 5.7.** Димензионе карактеристике АС серво мотора *ВSH055* (Страна 103)
- Слика 5.8.** Компоненте линеарног кретања по Y осе: а) вођица са колицима, б) навојно вретено, в) спојница и г) корачни мотор (Страна 104)
- Слика 5.9.** Димензионе карактеристике вођице са колицима *HGH20CA* (Страна 105)
- Слика 5.10.** Димензионе карактеристике навојног вретена са навртком *R16x16* (Страна 106)
- Слика 5.11.** Димензионе карактеристике корачног мотора *NEMA 23 - SB57B003* (Страна 107)
- Слика 5.12.** Лабораторијски симулатор процеса ливења (Страна 108)
- Слика 5.13.** Симулациони модел калупа и сензорска техника (Страна 109)
- Слика 5.14.** Ултразвучни сензор *Arduino HCSR04* (Страна 109)
- Слика 5.15.** Оптички сензор *G12-3A07PA* (Страна 110)
- Слика 5.16.** Мерна ћелија *CZL602-10Kg* (Страна 111)
- Слика 5.17.** Серво драјвер *Lexium LXM32M* и преглед његових прикључака (Страна 112)
- Слика 5.18.** Корачни драјвер *SD4350* (Страна 113)
- Слика 5.19.** *PLC Schneider Electric* серије *M238* типа *TM238LFDC24DT* (Страна 114)
- Слика 5.20.** Општа шема повезивања компоненти лабораторијске поставке (Страна 118)
- Слика 5.21.** Повезивање компоненти – енергетска шема (Страна 119)
- Слика 5.22.** Повезивање компоненти – управљачка шема (Страна 120)
- Слика 5.23.** Повезивање компоненти – сензорска техника (Страна 121)
- Слика 5.24.** Структура управљачког система (Страна 122)
- Слика 5.25.** Односи протока за три случаја током процеса пуњења (Страна 124)
- Слика 5.26.** Фази скупови првог улаза (Страна 125)
- Слика 5.27.** Фази скупови другог улаза (Страна 125)
- Слика 5.28.** Фази скупови излаза (Страна 126)
- Слика 5.29.** Фази управљачка површ (Страна 127)
- Слика 5.30.** Графички приказ података за обуку неуро фази регулатора (Страна 128)
- Слика 5.31.** Неуро фази управљачка површ (Страна 129)
- Слика 5.32.** Алгоритам рада управљачког система (Страна 130)
- Слика 5.33.** Променљива очитаног угла закретања лонца (Страна 131)
- Слика 5.34.** Функционални блок очитавања висине (Страна 132)

Слика 5.35. Функционални блок *homing* – а серво мотора (Страна 132)

Слика 5.36. Функционални блок *homing* – а корачног мотора (Страна 133)

Слика 5.37. Алгоритам имплементације фази регулатора у *PLC* контролер (Страна 134)

Слика 5.38. Функционални блок за прецизно позиционирање млаза (Страна 136)

Слика 5.39. Симулација процеса пуњења калупа на експерименталној лабораторијској поставци (Страна 136)

Слика 5.40. Мануелно управљање процесом (Страна 137)

Слика 5.41. Фази управљање процесом (Страна 137)

Слика 5.42. Неуро фази управљање процесом (Страна 137)

Табела 1.1. Подручја примене одговарајућих поступака ливења (Страна 5)

Табела 1.2. Примена техника рачунарске интелигенције у конвенционалним поступцима обраде резањем (Страна 6)

Табела 1.3. Примена техника рачунарске интелигенције у неконвенционалним поступцима (Страна 7)

Табела 3.1. Максимална и средња грешка ВМ 12–16–12–4 (Страна 52)

Табела 3.2. Експериментални резултати млевења кугли (Страна 55)

Табела 3.3. Максимална и средња грешка различитих архитектура ВМ (Страна 56)

Табела 3.4. Домен претраге величина које се оптимизују (Страна 59)

Табела 3.5. Максимална и средња грешка ВМ 12–16–12–4 (Страна 61)

Табела 4.1. Неке од вредности површина попречног пресека (Страна 76)

Табела 4.2. Домен претраге оптималних вредности (Страна 80)

Табела 4.3. Домен претраге оптималних вредности (Страна 89)

Табела 5.1. Техничке карактеристике пужног редуктора *СНМ301056В14* (Страна 101)

Табела 5.2. Техничке карактеристике АС серво мотора *BSH0551T11A2A* (Страна 101)

Табела 5.3. Механичке карактеристике *HGH20CA* (Страна 105)

Табела 5.4. Техничке карактеристике корачног мотора *NEMA 23 - SB57B003* (Страна 107)

Табела 5.5. Оптички сензор Q&W типа G12-3A07PA (Страна 110)

Табела 5.6. Техничка спецификација мерне ћелије *CZL602-10Kg* (Страна 111)

Табела 5.7. Преглед прикључака *Lexium LXM32* (Страна 112)

Табела 5.8. Опис конектора *P1* (Страна 113)

Табела 5.9. Опис конектора *P2* (Страна 114)

Табела 5.10. Електричне карактеристике (Температура околине $T_j=25^{\circ}\text{C}$) (Страна 114)

Табела 5.11. Напајање *PLC*-а серије *M238* типа *TM238LFDC24DT* (Страна 115)

Табела 5.12. Основне карактеристике стандардних логичких улаза (енгл. *normal inputs*) (Страна 115)

Табела 5.13. Основне карактеристике брзих улаза (енгл. *fast inputs*) (Страна 116)

Табела 5.14. Основне карактеристике стандардних транзисторских излаза (Страна 116)

Табела 5.15. Основне карактеристике брзих бројачких излаза (Страна 117)

Табела 5.16. Спецификација фази правила (Страна 126)

Табела 5.17. Матрична форма излаза фази/неуро фази регулатора (Страна 133)

Глава 1.

УВОД

Ливачка индустрија у Европи и свету бележи константан раст и развој, али је приметан не велики допринос техника рачунарске интелигенције развоју ове виталне индустрије. Нарочито је, за разлику од неких других индустријских процеса, уочљиво да многе ливнице нису имале користи од “интелигентне” аутоматизације. Српска индустрија се већ значајан временски период налази у озбиљном заостатку за светским индустријским трендовима и обимима њихових производних капацитета. Тај заостатак узрокован је променом политичких и економских околности, а видљив је на свим сегментима чак и елементарних производних процеса, у квантитативном и квалитативном смислу. Технолошки, материјални и кадровски проблеми интегрални су део целокупног заостатка за светским индустријским трендовима. Данас индустрија у Србији, или прецизније речено, оно што је остало од индустрије, не заостаје само технолошки за европским и светским индустријама, већ заостаје и у односу на технолошки ниво који је имала непосредно пре почетка распада СФР Југославије 1990. године. Грађански рат, санкције, економска изолација земље и очајне приватизације имали су за последицу да велики индустријски системи поклекну у потпуности или минимизују своје производне капацитете скоро до нивоа безначајности. Индустрија Србије за двадесет година изгубила је око 700.000 радних места што представља више од 2/3 индустријских радних места [1]. Српска индустрија је готово нестала. Индустријски развој је генератор преображаја целокупног друштва, од кога сви имају корист, а нико штету. Чак се у Србији, слабашној и неукој, из доба Обреновића, непосредно по ослобођењу од Турака, препознао значај индустријске производње за оправак, просперитет и безбедност нације. Тако је на пример

1848. године саграђена ливница за војне потребе, а први топ у њој произведен је 1853. године.

Предмет бављења ове докторске дисертације је унапређење производних процеса у ливачкој индустрији на светском али и локалном нивоу, нарочито на локалном јер ливачка индустрија код нас, као и индустрија генерално, пролази кроз исте фазе недаћа и изазова. Највећи светски произвођач одливака је Кина, чији производни капацитети чине око 44% светске производње [2]. Одмах иза Кине следи Индија, а иза ње је европска ливачка индустрија, чији је обим производње на годишњем нивоу 11,7 милиона тона црних и 2,8 милиона тона обојених одливака [3]. Немачка, Француска и Италија су три водеће земље произвођачи у Европи с укупном годишњом производњом од преко два милиона тона одливака по држави. Наведене земље уз Шпанију и Велику Британију чине 80% производње у Европи. До почетка деведесетих година прошлог века ливнице Србије биле су европски лидери, с годишњом производњом од 850.000 тона. Данас, две деценије касније, српска ливачка индустрија суочена је с великим проблемима. Србија располаже с капацитетима од око 130.000 тона одливака а искоришћеност капацитета је 40% [4].

Оздрављење домаће ливачке индустрије, али и индустрије Србије генерално, треба утемељити на стратешки обликованој реиндустријализацији заснованој на савременим техничко–технолошким и научним достигнућима уз перманентно прилагођавање захтевима тржишта. Кроз докторску дисертацију биће представљено унапређење процеса у светским и домаћим ливницама применом техника рачунарске интелигенције и савремених софтверских решења у процесу моделирања, оптимизације и управљања производним порецесима ливења.

1.1. ПРОЦЕС ЛИВЕЊА И РАЧУНАРСКА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА

Технолошки процес ливења је веома стар поступак који се дуго времена заснивао на емпиријским правилима услед недовољног познавања процеса који се одигравају током топљења, ливења и солидификације одливка у калупу. Иако, као производни процес, датира хиљадама година пре нове ере, фундаментални принципи ливења нису се значајније променили од самог настанка технологије ливења. Али научна сазнања се перманентно надограђују и, као резултат, дала су широк спектар поузданих технологија ливења и материјала, који се успешно обрађују тим технологијама. Ливење је веома комплексан процес јер обухвата велики број варијабли које захтевају добро познавање и контролисање њихове природе као значајног сегмента технолошког поступка. Квалитативне карактеристике материјала који се топи, процес топљења, чистоћа

истопљеног метала, температура и брзина ливења, квалитет калупа, уливни систем, систем храњења одливка, прецизност ливења итд. само су неке од значајног броја варијабли које утичу на коначан квалитет и карактеристике одливка. Процес ливења је јединствен процес обраде из више разлога. Најпре, као веома битну карактеристику треба приметити флексибилност у производњи, у смислу ширине комплексности одливака и распона њихових димензиона и тежинских карактеристика. Овај вид обраде метала омогућава израду делова од неколико грама па до неколико стотина тона, различите сложености. Економска одрживост система такође је детаљ који говори у прилог технологија ливења. Процена је да 90% произведених добара од метала чине одливци, који такође у истом проценту партиципирају у конструкцијама производних машина [5]. Разноликост у употреби одливака је директна последица функционалних предности и економских бенефита које ливење нуди у односу на друге методе обраде метала. Могућност широке примене одливака може се приписати разноврсној природи процеса ливења. Поступак ливења, генерално, карактеришу следећи кораци до добијања коначног производа: припрема почетне сировине, топљење сировине и довођење у стање за ливење, сипање истопљеног метала у калуп, очвршћавање у калупу, вађење готовог производа из калупне шупљине. Америчко ливачко друштво представља вишеструку природу технологије ливења, описујући 38 техника ливења, груписаних у пет категорија [6]. Класификација процеса ливења може се извршити на више начина, а она најопштија сугерисана престижним литературним изворима базира се на два основа, калупљењу и самом поступку ливења. Ако се процес посматра са становишта калупљења, подела је следећа: ливење у калупима за једнократну употребу и ливење у калупима за вишекратну употребу. Код ливења у једнократне калупе за израду сваког одливка мора се израдити нови калуп, док се код ливења у вишекратне калупе помоћу једног калупа обликује велики број одливака. Избор једнократног или вишекратног калупа врло је сложен, а зависи од технолошких и економских критеријума, од којих су најзначајнији врста легуре која се лије и величина серије. Калуп мора бити израђен од материјала температурно вишеструко отпорнијег него што је легура која се лије. Због тога се одливци легура више тачке топљења лију у једнократне калупе. Највише одливака се лије у једнократне калупе. У једнократним калупима могу се израдити одливци свих облика и димензија, могу се лити сви метали, а примерени су за појединачну, серијску, као и масовну производњу. Потребно је нагласити да се материјал од кога се израђује једнократни калуп не одбацује одмах након ливења, него се од истог тог материјала, уз одређене технолошке процедуре поново израђује калуп. Приближно, око 95% се може поново употребити, што је врло економично. Материјал за израду једнократних калупа назива се калупна мешавина, а

састоји се од основног материјала песка са прикладним везивима и додацима. Будући да се код коришћења једнократних калупа мора, пре уливања, за сваки одливак израдити нови калуп, због своје бројности ти се калупи израђују у ливници на калупним линијама. Вишекратни калупи израђују се од издржљивих металних материјала отпорних на топлоту, обично сивог лива и посебног челика који су прошли специфичну термичку обраду. Метални калупи називају се кокилама. Циклус израде једног одливка је знатно краћи него код ливења у једнократним калупима, јер је већа брзина хлађења одливка него у пешчаном калупу. Због бржег хлађења добија се финија структура (ситније зрно) и боља механичка својства одливка. С обзиром на њихову велику производност, поступци ливења са вишекратним калупима примерени су за механизацију, аутоматизацију и роботизацију. Предност вишекратних калупа је да се могу поново користити од 1000 до 100000 и више пута, зависно од легуре која се лије. Вишекратни калупи често се састоје од више сегмената и имају метална језгра са извлакачима, како би се и сложенији одливци могли извадити из калупа. Ако се пак посматра директно процес, подела је креирана на основу силе уливања: гравитационо ливење и ливење употребом притиска. Код гравитационог ливења калуп се попуњава под дејством силе земљине теже. Брзина струјања растопљеног метала зависи од висине ливења и од конструкционог решења уливног система. Помоћу избора одговарајућих попречних пресека елемената уливног система може се израчунати проток и време уливања истопљеног метала. Код ливења уз примену притиска, зависно од притиска, велике су брзине струјања растопљеног метала, па је време попуњавања калупа врло кратко. На слици 1.1 дат је шематски приказ технологија ливења, узимајући у обзир оба основа њихове поделе.



Слика 1.1. Подела технолошких поступака ливења према уливној сили и врсти калупа и модела [7]

У табели 1.1 дат је преглед технолошких поступака ливења и њихове примене са становишта легуре која се лије, масе одливка и производног обима.

Табела 1.1. Подручја примене одговарајућих поступака ливења [7]

Технолошки поступак	Легура	Маса одливка	Величина серије
Ливење у песку (ручно калупљење)	Све ливачке легуре (углавном сиви лив, нодуларни лив, челик, бронза)	До 100 тона	Појединачни делови, мале серије
Ливење у песку (машинско калупљење)	Све ливачке легуре (углавном сиви лив, нодуларни лив, легуре алуминијума)	Од 1 килограма до неколико тона	Мале и велике серије
Шкољкасто калуповање	Све ливачке легуре (углавном сиви лив, нодуларни лив)	Од 1 – 150 килограма	Средње и велике серије
Ливење испарљивим моделом	Сиви лив, нодуларни лив, челик, легуре алуминијума	До неколико тона	Појединачни делови, мале и велике серије
Прецизно ливење	Све ливачке легуре	Од 1 грама до 100 килограма	Појединачни делови, мале и велике серије
Ливење у кокилама	Сиви лив, нодуларни лив, алуминијум, бакар, магнезијум, цинк легуре	До 100 килограма	Средње и велике серије
Ливење под ниским притиском и повратним притиском	алуминијум, бакар, магнезијум легуре	До 70 килограма	Средње и велике серије
Ливење под притиском	алуминијум, бакар, магнезијум, цинк, олово легуре	До 60 килограма	Средње и велике серије

Рачунарска интелигенција, као део рачунарске науке, бави се разумевањем природних процеса и имплементацијом њихових принципа у изградњу рачунарских система способних за интелигентно деловање. Рачунарска интелигенција подразумева више различитих приступа, међу којима се, начелно издваја пет, а то су: експертски системи (ЕС), вештачке неуронске мреже (ВНМ), генетски алгоритми (ГА), фази логика (ФЛ) и разни хибридни системи као комбинација два или више поменутих приступа [8]. Експертски системи су интелигентни рачунарски програми, који опонашају способност одлучивања човека експерта у одговарајућој области. Способни су да на бази знања решавају најразличитије проблеме који би иначе захтевали људску експертизу. Вештачке неуронске мреже су узор нашле у начину којим мозак процесира информације, а то је паралелно процесирање информација у великом броју међусобно повезаних нервних ћелија – неурона [9]. Генетски алгоритми су инспирацију нашли у природној еволуцији и начину на који се живи организми прилагођавају да би опстали у суровој реалности

околине. Фази логика се углавном користи у системима управљања, а поједностављење које она уводи у системе управљања је могућност коришћења уобичајеног говора за опис проблема и дефинисање не толико стриктних правила. Хибридни системи комбинују више наведених техника рачунарске интелигенције у истом процесу, тежећи истом циљу. На пример, нуру – фази системи симултано користе фази логику и неуронске мреже, док у неком другом случају нуру мреже могу бити подсистем који своје излазе прослеђују нпр. генетском алгоритму [10]. Све наведене технике и њихове хибридне комбинације позиционирале су се у машинском инжењерству као веома важан фактор у истраживању и развоју одговарајућих области машинства. Моделирање, оптимизација и управљање применом техника рачунарске интелигенције, заступљени су у свим технолозијама производног машинства, почевши од конвенционалних, преко неконвенционалних, па до нових и напредних технологија. У наставку је дат врло кратак преглед примене техника рачунарске интелигенције у неким технолозијама производног машинства, са циљем да се представи њихова заступљеност у наведеној области. Наиме, у табелама 1.2. и 1.3. дат је приказ само неколико примена техника рачунарске интелигенције у неким конвенционалним и неконвенционалним поступцима производног машинства.

Табела 1.2. Примена техника рачунарске интелигенције у конвенционалним поступцима обраде резањем

Аутори	Примењена техника рачунарске интелигенције	Назив процеса	Опис примене
<i>Azlan Mohd Zain, Habibollah Haron, Safian Sharif, 2010.</i>	Вештачке неуронске мреже (ВНМ)	Глодање	У раду је развијен модел ВНМ за предикцију храпавости обрађене површине. Резултат предикције су режими резања за које је храпавост минимална [11].
<i>Doriana M. D'Addona, Roberto Teti, 2013.</i>	Генетски алгоритми (ГА)	Стругање	У раду је оптимизован производни процес стругања. Тачније минимизовано је време израде у функцији режима обраде, узимајући у обзир ограничења која диктира технологија и материјал [12].
<i>E.O. Ezugwu, D.A. Fadare, J. Bonney, R.B. Da Silva, W.F. Sales, 2005.</i>	Вештачке неуронске мреже (ВНМ)	Стругање	У раду је развијен модел ВНМ који успоставља корелацију између скупа параметара, који карактеришу процес стругања, организованих у улазе и излазе из мреже. Модел омогућава предикцију комплексних односа између режима обраде и процесних параметара и на тај начин производни процес чини ефикасним и економичним [13].

<i>T. Deepan Bharathi Kannan, G. Rajesh Kannan, B. Suresh Kumar, N. Baskar, 2014.</i>	Хибридна комбинација (ВНМ – ГА)	Бушење	У раду је применом ВНМ моделиран процес бушења са циљем успостављања кореалције између режима обраде и квалитета отвора и производности. ГА као оптимизациона техника се користи у проналажењу оптималних параметара [14].
<i>Dohyun Kim, Doyoung Jeon, 2010.</i>	Фази логика (ФЛ)	Глодање	У раду је представљено управљање, помоћу фази контролера, брзином резања са циљем регулисања силе резања на вертикалном обрадном центру [15].
<i>Saravanan R, P Asokan, M Sachidanandam, 2002.</i>	Генетски алгоритми (ГА)	Брушење	У раду је представљена ГА оптимизација режима завршне обраде брушењем, са циљем да се минимизују трошкови производње узимајући у обзир ограничења дефинисана топлотним оштећењима и карактеристикама тоцила [16].
<i>F. Dweiri, M. Al-Jarrah, H. Al-Wedyan, 2003.</i>	Хибридна комбинација (ФЛ – ВНМ)	Глодање	У раду је моделиран процес глодања алуминијума применом хибридног неуро – фази система. На основу ефеката режима обраде на мерило квалитета обраде, храпавост обрађене површине, пронађени су режими за које је најбољи квалитет обраде [17].

Табела 1.3. Примена техника рачунарске интелигенције у неконвенционалним поступцима

Аутори	Примењена техника рачунарске интелигенције	Назив процеса	Опис примене
<i>D.S. Srinivasu, N. Ramesh Babu, 2008.</i>	Хибридна комбинација (ВНМ – ГА)	Абразивни водени млаз	У раду је представљен неуро – генетски приступ у проналажењу параметара обраде абразивним воденим млазом, за које се дубина реза одржава на жељеној вредности [18].
<i>Pandu R. Vundavillia, M.B. Parappagoudarb, S.P. Kodalic, Surekha Benguluri, 2012.</i>	Хибридна комбинација (ФЛ – ГА)	Абразивни водени млаз	У раду је представљен развој експертског система базираног на фази – генетској комбинацији са циљем да се елиминише обиман експериментални рад за утврђивање најугицајнијих параметара на дубину реза [19].
<i>N. M. Noaman, M.M. AL-Khalidy, Osama Y. Al- Rawi, 2013.</i>	Хибридна комбинација (ВНМ – ФЛ)	Ласерско сечење	У овом раду коришћена је неуро – фази комбинација за управљање ласерским снопом, тј. количином која пада на радни комад [20].

<i>N. K. Jain, V. K. Jain, 2007.</i>	Генетски алгоритми (ГА)	Електрохемијска обрада	У овом раду представљена је ГА оптимизација три параметра електрохемијске обраде (проток електролита, брзина, напон) са циљем минимизације геометријских нетачности [21].
<i>S. Klančnik, D. B. Hajdarević, M. Paulić, M. Ficko, A. Čekić, M. Č. Husić, 2015.</i>	Вештачке неуронске мреже (ВНМ)	Ласерско сечење	У раду је представљено моделирање процеса сечења ласером, успостављањем корелације између снаге ласера, брзине резања, типа гаса са једне и ширине реза и квалитета обраде са друге стране [22].

1.2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Као и у већ поменутих областима производног машинства, и у ливарству је примена техника рачунарске интелигенције веома важан фактор у истраживању и унапређењу процеса ливења. У наставку су на систематичан начин представљене неке од примена техника рачунарске интелигенције у моделирању, оптимизацији и управљању процесима у ливницама. Такође, истакнут је значај и примена савремених *CAD/CAM* софтверских система у истраживањима дизајна система ливења.

Моделирање процеса топљења метала у ливницама представљало је истраживачки изазов за многе истраживаче, са циљем да се задовоље индустријски захтеви за континуираном анализом и реинжењерингом производних процеса. Развијен је значајан број модела за управљање процесом топљења метала како би се пратили трошкови материјала и енергије. То су углавном били математички модели и модели базирани на примени методе коначних елемената. Њихова применљивост је била ограниченог карактера због комплексности процеса који описују, што је заједно са развојем рачунарске интелигенције резултирало применом техника рачунарске интелигенције у процесима моделирања топионичарских производних процеса. *Fernández* и његови коаутори (2008) представљају примену ВНМ у процесу моделирања производње челика у електролучној пећи, са основним циљем да се кроз предикцију коначне температуре смањи потрошња енергије у електролучној пећи [23]. *Thomas* је још раније са својом групом истраживача (1999) представио предикцију коначне температуре челика произведеног у индукционој пећи, употребом ВНМ [24]. *Das* и његови сарадници (2010) презентују стратегије управљања производњом челика у електролучној пећи, регулишући хемијски састав и нечистоће. Као технике рачунарске интелигенције користе ВНМ и хибридную комбинацију ВНМ и ФЛ [25]. *Vouhouche* и његови коаутори (2004) такође се баве моделирањем процеса

добијања челика, и, користећи ВНМ, омогућују управљање процесом легирања и енергентима како би се добио захтевани хемијски састав и температура легуре која се лије [26].

Када је у питању сам процес ливења правци истраживања, заснованих на примени техника рачунарске интелигенције, широког су дијапазона, што због великог броја технологија ливења, што због комплексности сваке од њих. Santos и његови коаутори (2003) користе ГА у оптимизацији процеса континуалног ливења. Њихов циљ је максимизација квалитета челичних гредица претрагом оптималних услова хлађења и металуршких критеријума [27]. Vijian и Arunachalam (2007) такође користе ГА у оптимизацији процеса ливења легуре алуминијума под притиском, тако што су предмет претраге параметри ливења са циљем добијања најбољих механичких особина одливка [28]. Zhang и његови сарадници (2011) користе хибридную комбинацију ВНМ и ГА у процесу моделирања и оптимизације ливења под ниским притиском легуре алуминијума. Резултат њиховог истраживања је показао високу успешност комбинације ВНМ и ГА у избору параметара процеса ливења под ниским притиском [29]. Anijdan са својим коауторима (2006) представља хибридную комбинацију ВНМ и ГА у проналажењу хемијског састава и брзине хлађења за које је порозност одливка легуре алуминијума минимална [30]. Shabani и Mazahery (2011) применом ВНМ успостављају однос између механичких особина одливка са једне стране и услова очвршћавања одливка са друге стране. Улазне величине у мрежу генеришу се применом методе коначних елемената у симулацији процеса ливења [31]. Zheng и сарадници (2009) употребом ВНМ успостављају корелацију између површинских дефеката одливка и параметара ливења под високим притиском, као што су: температура калуца, температура метала, брзина убризгавања [32]. Singha и Singh (2015) употребом ВНМ моделирају процес ливења у песку, успостављајући корелацију између дефеката одливка и параметара ливења у песку [33]. Jakubski и Dobosz (2010) употребом ВНМ успостављају везу између влажности песка за пешчане калуце и особина пешчаног калуца као што су: пропустљивост, компактност и трошност [34]. Karunakar и Datta (2008), као и нешто касније Parekh и Vadher (2016), представљају употребу ВНМ као система за превентивно деловање, који омогућује предикцију дефеката у и на одливку, на основу карактеристика пешчаног калуца и елементарних параметара ливења [35, 36]. Parappagoudar и његови сарадници (2008) користе ВНМ и хибридную комбинацију ВНМ – ГА да пронађу оптималне вредности параметара као што су величина и облик зрна песка, везиво, вода како би се добио калуп захтеване тврдоће, отпорности на притисак и пропустљивости [37]. Xue-dan Gong са својим коауторима (2016) оптимизује геометрију система храњења одливка хибридном комбинацијом ВНМ – ГА. ВНМ

успостављају корелацију између улазних параметара које представља геометрија система храњења и излазних параметара који се односе на запреминско скупљање и порозност у одливку. ГА проналази оптималну геометрију за коју су резултати значајно повољнији у њиховом истраживању [38]. *Lagdive* и *Inamdar* (2013) базирају своју оптимизацију система храњења одливка на примени ГА и модула хранитеља, добијајући оптималну геометрију хранитеља способну да надомести запреминско скупљање одливка током хлађења [39]. У истраживачким подухватима процеса ливења честа је и примена савремених *CAD/CAM* софтверских система. Њихов значај огледа се у ефикасном дизајну елемената система ливења и симулацији самог процеса ливења која доноси круцијалне закључке за производни процес, о квалитету процеса и производа. *Nimbulkar* и *Dalu* (2016) представљају примену софтвера *Auto-CAST XI* за симулацију процеса ливења. Наиме, аутори истичу значај дизајна уливног система и система храњења за исправност одливка кроз бројне симулације у поменутом софтверу [40]. *Jie* и његови коаутори (2014) користе софтверски пакет *Pro Cast* у унапређењу ливења легуре алуминијума, и доносе закључак да повећање температуре лива и брзине ливења решава проблем порозности [41]. *Dabade* са својим сарадницима (2013) користи софтвер за симулацију процеса ливења *MAGMASoft*, за анализу различитих недостатака у процесу ливења, детектујући њихов узрок кроз симулације димезионо и позиционо различитих варијанти система ливења и храњења [42]. Комбинација техника рачунарске интелигенције и савремених софтверских пакета такође је заступљена у истраживањима процеса ливења. Штавише, пожељна је, јер примена техника рачунарске интелигенције чини процес дизајна ефикаснијим, а симулација процеса долази као својеврсна верификација онога што је постигнуто применама техника рачунарске интелигенције. *Jacob* и његови сарадници (2004) презентују интеграцију ГА и *CAD* софтвера у оптимизацији система храњења [43]. *Susac*, са својим коауторима, (2009) користи комбинацију ВНМ и софтвера за симулацију процеса ливења *V-Shrink (RIKEN Institute Japan)*, у моделирању односа параметара процеса ливења и параметара естимације процеса ливења након фазе скупљања. За изградњу неуро мреже користе податке добијене софтверском нумеричком симулацијом [44]. *Vosniakos* и његови сарадници (2009) представљају веома корисно истраживање кроз које презентују интеграцију ВНМ и софтвера *Procast system*, за симулацију процеса ливења. Они заправо податке из скупа стратешки организованих симулација за одливке различитих димензија користе у изградњи неколико модела ВНМ интегрисаних у један неуро систем планирања производње ливењем [45]. *Krimpenis* са својим коауторима нешто раније (2006), такође користи софтверско решење *Procast system* као извор података за изградњу хибридног интелигентног система ВНМ - ГА. Наиме, они ВНМ успостављају

корелацију између параметара као што су брзина у уливнику, температура калуца са временом пуњења калуца, временом очвршћавања, дефектима... ГА, као оптимизациона техника има улогу у дефинисању оптималних вредности улаза за које се добијају жељене вредности процеса [46]. *Weixiong* и његови коаутори (2009) користе ГА као оптимизациону технику у комбинацији са Гаусовом регресијом и софтверским пакетом *Procast system* да оптимизују параметре процеса ливења легуре магнезијума [47].

Поред ГА као технике рачунарске интелигенције и инжењерски апликативно ефикасног оптимизацијског алата, у оптимизационим процесима ливења приметно је присуство и других метахеуристичких оптимизационих техника. Тако на пример *Gravel* са својим коауторима (2002) представља примену технике оптимизације помоћу мравље колоније (*Ant Colony Optimization – ACO*) у процесу планирања континуалног ливења алуминијума у ливници [48]. А *Surekha* са својим коауторима (2012) представља оптимизацију пешчаног калуца, тј. улазних параметара као што су финоћа зрна, проценат глине, проценат воде итд. да би се добио калуп жељене пропустљивости, тврдоће, отпорности на притисак... Као оптимизациона техника уз примену ГА, коришћена је и техника оптимизације помоћу ројева честица (*Particle Swarm Optimization – PSO*) [49].

Ако се направи осврт на управљање процесима у ливницама, приметно је да су технике рачунарске интелигенције такође нашле примену, пре свих фази логика и њене хибридне комбинације са другим техникама рачунарске интелигенције. Интелигентно управљање је у неким технологијама ливења више заступљено, у неким мање, а постоје и оне технологије ливења где интелигентно управљање није имплементирано уопште. *Mugwagwa* и његови коаутори (2013) развили су фази контролер за управљање процесом континуалног ливења, како би се елиминисала два највећа недостатка конти ливења, као што су пукотине и прекидања [50]. *Mauder* и његови коаутори (2015) такође се баве проблематиком у технологији континуалног ливења, и презентују фази регулацију параметара ливења као што су брзина ливења, интезитет хлађења итд. засновану на нумеричкој предикцији температуре [51]. *Yang* са својим сарадницима (2008) представља развој фази контролера за управљање температуром у процесу ливења под високим притиском, што је од есенцијалног значаја за квалитет одливка и високу производност [52]. *Li Qiang* са својим коауторима (2011) представља интелигентни фази сиситем управљања машином за ливењем под ниским притиском, која је усвојена од стране више корисника у Кини за производњу алуминијумских одливака високе тачности [53]. Када је у питању гравитационо ливење у пешчаним калупима и ливничке активности везане за ову технологију, аутоматизовани системи који минимизују учешће човека [54–56] и побољшавају прецизност ливења били су предмет истраживања и крајем двадесетог века

[57]. Касније се налази на мали број истраживања, углавном реализованих од исте групе истраживача. Основа тих истраживања је пажљиво изграђен математички модел процеса. На пример, *Sugimoto* и његови коаутори (2002) представљају управљање аутоматизованим роботом за симулацију сипања течног метала, са основним циљем да се одржава ниво у уливној чаши и да се смање вибрације флуида [58]. *Noda* и његови сарадници (2005) такође се баве управљањем које има за циљ одржавање нивоа у уливној чаши и смањење вибрација флуида. Њихова експериментална поставка је слична, с тим што је у овом случају ливачки лонац цилиндричног облика што мења математички модел протока течности [59]. Иста група аутора (2007) представља управљање протоком засновано на математичком моделу креираном на бази закона одржања маса и Бернулијеве теореме. Систем је тестиран у експерименталним условима са водом, али и у реалним са истопљеним металом [60]. *Yano* и његови сарадници (2010) публикују веома квалитетно и садржајно истраживање, у коме је представљен развој супервизорског управљања аутоматским процесом сипања а све у циљу повећања продуктивности, безбедности радника и повећања квалитета производа. Управљање је засновано на робусном математичком моделу који укључује низ процесних појава током сипања. Ваљаност управљачког система потврђена је кроз симулације и експерименте [61].

1.3. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА И ЦИЉЕВИ

Предмет истраживања у оквиру докторске дисертације, као што је на самом почетку наглашено, развој управљања, моделирање и оптимизација процеса ливења засновано на примени метода вештачке односно рачунарске интелигенције. У процесу унапређења процеса у светским и домаћим ливницама значајни потенцијал има примена техника рачунарске интелигенције и савремених софтверских решења у процесу моделирања, оптимизације и управљања производним процесима ливења.

Савремена истраживања у области управљања иду у сусрет све строжијим захтевима у погледу жељеног понашања и перформанси техничких система, као и у погледу обезбеђења њиховог интегритета у широком опсегу радних услова, што подразумева нове особине које укључују чак и подражававање људских способности, као што су планирање, учење и адаптација. Осим тога, све више се подразумева да карактеристике управљачког система морају одговарати комплексности процеса, укључујући нелинеарност и временску променљивост, димензионалност и мултиваријабилност, сложеност жељених управљачких циљева, несавршеност и несигурност мерења, као и потребу да се реагује у случају отказа компоненти система. Реализација флексибилнијих и моћнијих управљачких

система нове генерације подразумева, поред примене углавном алгоритамских приступа из домена класичне теорије управљања, укључивање и других елемената, као што су логика, закључивање и хеуристика, а такви системи управљања познати су под називом интелигентни системи управљања. Област интелигентног управљања остварује циљеве обухватањем широког спектра разнородних методологија, од којих прворазредни значај имају фази логика, неуронске мреже и генетски алгоритми. Проблем пројектовања и примене интелигентног управљања уско је повезан са проблемима моделирања и оптимизације система применом истих техника рачунарске интелигенције. Унапређење производних процеса у ливницама у оквиру истраживања обухваћених докторском дисертацијом укључила су моделирање процеса топљења метала, оптимизацију система ливења у песку и управљање процесом ливења.

Топљење метала у пећима је процес сложене природе због динамике нелинеарних хемијских реакција. Конвенционални математички и термодинамички модели, који су свакако од помоћи, нису у потпуности поуздани због сложене интеракције процесних варијабли. Неуронске мреже, као једна од кључних техника рачунарске интелигенције, у стању су да идентификују унутрашње односе кроз обучавање. Као такве могу се користити као ефикасан алат у дефинисању жељеног хемијског састава истопљеног метала омогућујући унапређење процеса легирања. Литературним прегледом дата су нека истраживања која потврђују оправданост употребе техника рачунарске интелигенције у моделирању и оптимизацији процеса топљења метала. За разлику од наведених истраживања, истраживање под окриљем ове дисертације направило је својеврстан искорак и употребом техника рачунарске интелигенције интегрисало више међусобно повезаних и зависних производних процеса.

Правилно и потпуно попуњавање калупа важан је задатак код процеса ливења, којим се постиже висок квалитет одливка. Улога дизајна уливног система и дизајна хранитеља у остварењу овог циља веома је значајна. Неправилан дизајн уливног система доводи до бројних недостатака у процесу ливења, што за последицу има низак квалитет одливка. То су углавном следећи недостаци: непотпуно пуњење калупа, чврсти и гасовити укључци. Непотпуно пуњење калупа манифестује се у два облика, као хладни варови и шупљине у одливку. Хладни варови се јављају у случају сусрета два флуида супротних смерова који се не могу стопити у потпуности. Шупљина у одливку се јавља када растопљени метал не попуни одређене делове калупа. Чврсти укључци су директна последица турбуленција и манифестују се као укључци песка, док се гасовити укључци јављају у облику заробљеног ваздуха у калупу, као “надувани” отвори и порозност. Дакле, задатак уливног система је да обезбеди глатко, уједначено и потпуно пуњење калупа чистим, истопљеним металом.

Глатко пуњење елиминише турбуленције, уједначено пуњење обезбеђује континуирано пуњење у току времена, а потпуно пуњење подразумева вођење истопљеног метала до танких и крајњих делова калуца. Током хлађења одливка долази до запреминског скупљања метала, тј. смањења запремине одливка. Значај хранитеља огледа се у њиховој функцији да надокнађују одливку мањак течног метала услед запреминског скупљања. На основу наведеног као императив се намеће оптимално конструисање уливног система и хранитеља који ће задовољити захтев за високим квалитетом одливка и уштедом материјала. Комбинација оптимизације генетским алгоритмом, као једне од фундаменталних техника рачунарске интелигенције, и *CAD/CAM* софтвера пружа могућност ефикасне оптимизације и дизајна, верификованог нумеричком симулацијом. Сагледавши истраживачке правце, већина доступних истраживања бави се проблемима локације уливника у систему ливења, минимизацијом брзине истопљеног метала у уливнику, минимизацијом деформација, оптимизацијом позициције, типа и запреминских карактеристика хранитеља итд. За разлику од литературно доступних истраживања, истраживање спроведено под окриљем ове докторске дисертације бави се максимизацијом стопе пуњења калуца, што је посебно значајно за танке и дуге одливке који брзо губе топлоту, а већа брзина пуњења калуца помаже да се елиминишу појаве хладних варова и шупљина.

За разлику од неких других индустријских процеса, многе ливнице нису имале користи од напредне аутоматизације, те се процес пуњења калуца још увек углавном одвија ручно. Аутоматизовани системи који минимизују учешће радника и повећавају прецизност ливења, такође представљају предмет истраживања у оквиру предложене докторске дисертације. Спроведена доступна истраживања представљају управљања процесом гравитационог ливења базирана на математичким моделима. Овај део истраживања обухвата предлог управљања погоном, развој лабораторијског симулатора ливења и разраду могућности примене интелигентног управљања пуњењем калуца.

Сви побројани истраживачки резултати, засновани на примени техника рачунарске интелигенције и савремених *CAD/CAM* софтверских решења, треба да утичу на унапређење производних процеса у светским и домаћим ливницама. Истраживачки циљ доктората је потврда хипотезе да је активности у производним процесима ливења могуће унапредити техникама рачунарске интелигенције, што за последицу треба да има унапређење производње у смислу ефикасности, економичности и квалитета, што је и жељени крајњи домет ове докторске дисертације.

Први део истраживања има за циљ да унапреди процес топљења метала, у смислу добијања жељеног хемијског састава. Задатак истраживања укључује развој

интелигентног софт сензора за управљање процесом легирања, као и могућност интеграције више међусобно повезаних производних процеса. Повезивање производних процеса и развој интелигентног софт сензора биће базирано на комбинованој примени неуронских мрежа и генетских алгоритама, уз могућност примене других метахеуристичких оптимизационих техника. Експериментални подаци на којима се темељи истраживање прикупљени су у индустријским комплексима “РТБ Бор” и “ИКГ Гуча”.

Други део истраживања има за циљ да представи методологију конструисања оптималног система ливења, за одливке комплексне геометрије, који ће одговорити захтевима за високим квалитетом одливка и уштедом материјала. Предмет истраживања је процес ливења у песку носача зуба багера из Рударског басена Колубара. Генетски алгоритам, као оптимизациона техника заснована на биолошком процесу еволуције, употребљен је за дефинисање кључне геометрије система ливења као и геометрије система храњења одливка. Савремени софтверски системи *PTC Creo 2.0 Academic Edition* и *MAGMASOFT* биће употребљени у фазама моделирања система ливења и нумеричке симулације процеса ливења у песку.

Трећи део истраживања има за циљ да представи могућности примене интелигентног управљања, заснованог преваходно на фази логици, у производном процесу ливења. У ту сврху представљена је идеја аутоматизованог погона у ливници, затим развијен лабораторијски симулатор ливења, који се користи као експериментална опрема у поменутом истраживању. Његове функције су приближене реално остварљивом индустријском аутоматизованом погону. Основни циљ управљања представља, поред побољшања услова рада за производне раднике, и прецизно пуњење калупа. Појам прецизно пуњење калупа дефинисан је са три кључне тачке током процеса. Прва је прецизно падање млаза у уливну чашу, друга је одржавање константног нивоа истопљеног метала у чаши и, коначно, трећа је елиминисање преливања истопљеног метала из калупа. Сви наведени правци истраживања, могу резултирати значајним унапређењем производних процеса у ливницама, и поседују сами по себи велики истраживачки потенцијал.

1.4. ПРИМЕЊЕНЕ НАУЧНЕ МЕТОДЕ

У дисертацији су предложени поступци за управљање, моделирање и оптимизацију процеса ливења засновани на примени метода рачунарске интелигенције и уз коришћење савремених софтверских пакета за моделирање и нумеричку симулацију процеса ливења.

У те сврхе, из домена вештачке интелигенције, примењене су неуронске мреже, фази системи, генетски алгоритми и друге метахеуристичке оптимизационе технике као и њихове хибридне комбинације. За моделирање и симулацију процеса ливења коришћени су софтверски пакети *PTC Creo 2.0 Academic Edition* и *MAGMASOFT*.

У процесу моделирања топљења метала, са циљем да се управља легирањем, предложена је превасходно употреба неуронских мрежа као методе вештачке интелигенције која се показала као веома погодна техника за моделирање у великом броју сложених индустријских апликација. Као метода за интеграцију производних процеса који су директно везани за квалитет топљења и ливења метала, предложена је хибридна неуро-генетска комбинација, где се генетски алгоритам користи као оптимизациона методологија а неуронска мрежа као методологија за процену његове функције добротe (енг. *fitness function*).

Процес оптималног конструисања уливног система и система храњења одливка, је заснован превасходно на предложеној примени генетског алгоритма, као оптимизационе технике засноване на биолошком процесу еволуције, као и на примени једне од метахеуристичких оптимизационих техника, оптимизације ројем честица. Примена *CAD/CAM* софтверских пакета предвиђена је за моделирање и нумеричку симулацију процеса у циљу верификације добијених резултата.

Коначно, развој управљачких система заснива се на примени интелигентног управљања као методологије, тј. превасходно на примени фази и неуро-фази система из домена вештачке интелигенције. У развоју интелигентних управљања за ове процесе користи се лабораторијски симулатор ливења, експериментално постројење које је развијено за потребе овог доктората у Лабораторији за мехатронику Факултета техничких наука у Чачку.

Глава 2.

ТЕХНИКЕ РАЧУНАРСКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ

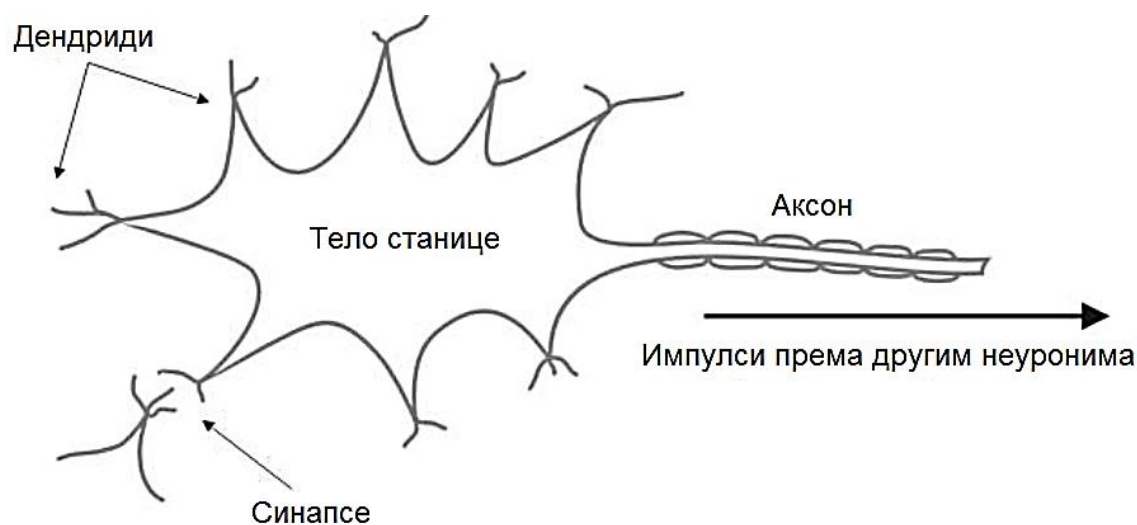
Данас се под појмом технике рачунарске интелигенције подразумева велики скуп различитих техника које су нашле примену у решавању проблема у најразличитијим областима. Оне које су изложене у наставку директно су везане за тему дисертације, прецизније, нашле су примену у решавању проблема дефинисаних предметом и циљем овог истраживања.

2.1. ВЕШТАЧКЕ НЕУРОНСКЕ МРЕЖЕ

Вештачке неуронске мреже (ВНМ) представљају методологију којом се знање прикупљено из сетова података смешта у дистрибуираном облику у повезану структуру мреже. ВНМ сачињавају једноставне међусобно повезане процесне јединице, неурони. Први радови из области неуронских мрежа настали су још пре нешто више од 70 година. Наиме, 1943. године *McCulloch* и *Pitts* предложили су први систем који функционише користећи принципе нервног система. Године 1949. *Hebb* је предложио правило којим се описује процес учења, а седам година касније представљена је прва симулација *Hebb* – овог модела. *Rosenblatt* је 1958. године развио прву ВНМ коју је назвао перцептроном. *Widrow* и *Hoff* су 1960. године предложили нови алгоритам учења који су користили за адаптацију параметара перцептрона са линеарним активационим функцијама. *Widrow-Hoff* – ово правило учења се и данас користи. Након тога приметан је застој у публикавању резултата

истраживања нових архитектура, правила и алгоритама учења, све до 1986. године. Та година се сматра поновним почетком развоја области ВНМ, јер је у њој публикована данас најпопуларнија процедура учења са пропагацијом грешке уназад (*backpropagation algorithm*) [62]. ВНМ као и све методе вештачке интелигенције имају своје предности и мане, па и њихова применљивост зависи од врсте проблема који треба да реше. Општа карактеристика је да се веома добро сналазе у проблемима са непотпуним сетом података, непотпуно дефинисаним проблемима које људи решавају интуитивно, као и да се могу успешно носити са нелинеарним проблемима. Оно у чему се ВНМ не истичу су проблеми у којима се захтева висока нумеричка тачност, као што су логички задаци и аритметички проблеми [10].

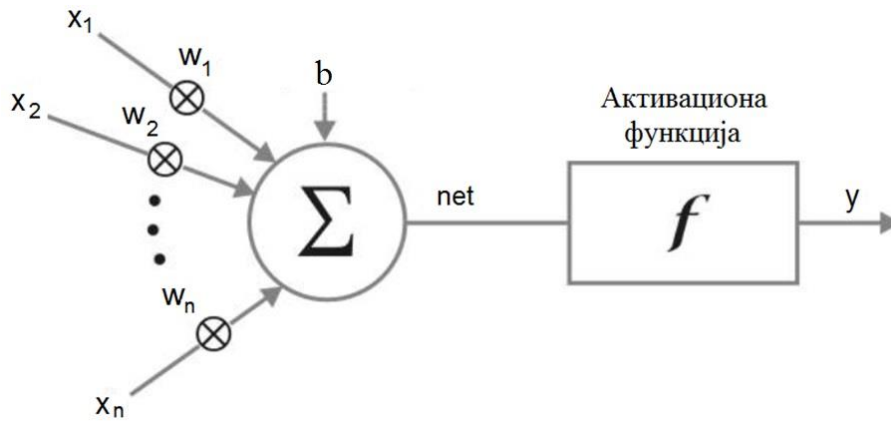
Да би се лакше спознао принцип рада ВНМ, потребно је познавати принцип рада људског мозга којим је развој ВНМ инспирисан. Људски мозак састављен је од око 10^{11} неурона, којих има више од 100 врста и који су сходно својој функцији распоређени према тачно дефинисаном распореду. Сваки неурон је у просеку повезан с 10^4 веза по елементу. Четири су основна дела неурона: тело станице (сома), скуп дендрита (огранака), аксона (дугачке цевчице које преносе електричне поруке) и низа завршних чланака.



Слика 2.1. Шематски приказ биолошког неурона

Дендрити служе за прихватање сигнала од других неурона и представљају продужетке тела станице. Ову функцију обавља и тело станице, али је већи део веза остварен преко дендрита. Тело сабира сигнале са више улаза. Аксон је један дугачак продужетак који преноси сигнал од тела станице до других неурона. Тачка контакта између аксона једне ћелије и дендрита друге ћелије зове се синапса. У непобуђеном стању потенцијал тела неурона је око $-70mV$. Потенцијал тела неурона се мења довођењем сигнала на неку од синапси (смањује се или повећава у зависности од тога да ли је синапса инхибиторна или

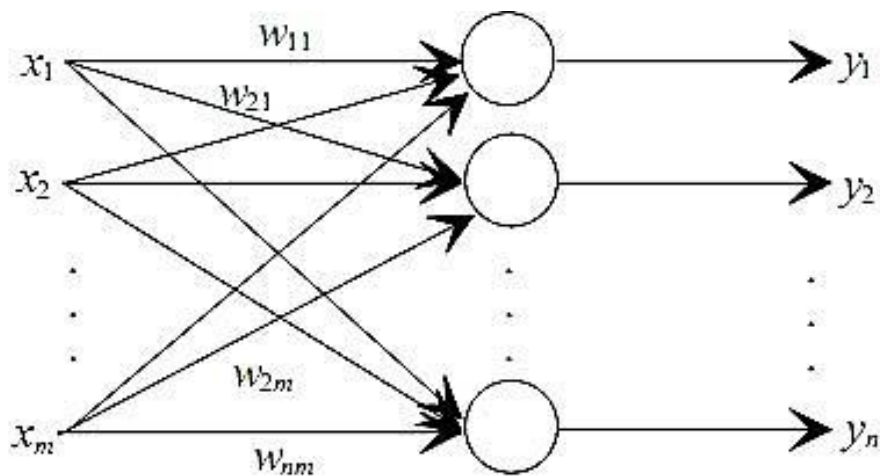
ексцитаторна). Када се прекорачи активациони потенцијал долази до излазне активности неурона [63, 64]. Вештачке неуронске мреже нису тако сложене као људски мозак, а оно што је заједничко за њих је то што су им градивни елементи једноставни и међусобно повезани, а везе између неурона одређују функцију мреже. По аналогији са биолошким неуроном развијен је вештачки неурон, приказан на слици 2.2., где су: $x_1 \dots x_n$ - улазни сигнали, $w_1 \dots w_n$ - тежински коефицијенти, b - праг активације, f - активациона функција, y - излаз из неурона.



Слика 2.2. Модел вештачког неурона

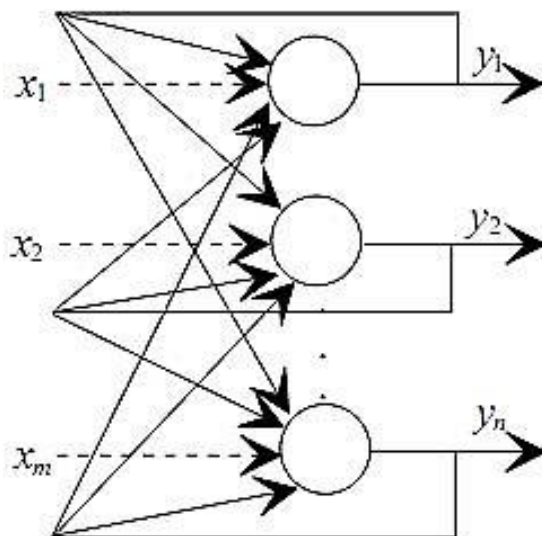
Вештачка неуронска мрежа се формира од већег броја међусобно повезаних неурона распоређених по слојевима. Неурони су спојени у мрежу тако да излаз сваког неурона представља улаз у један или више других неурона. Излазни неурони генеришу излазне сигнале. Разликују се две класе ВНМ [64]:

- Без повратних веза (нерекурентне) – сигнали се преносе само у једном смеру од улаза ка излазу (Слика 2.3).



Слика 2.3. Једнослојна нерекурентна мрежа

- Са повратним везама – рекурентне (Слика 2.4).

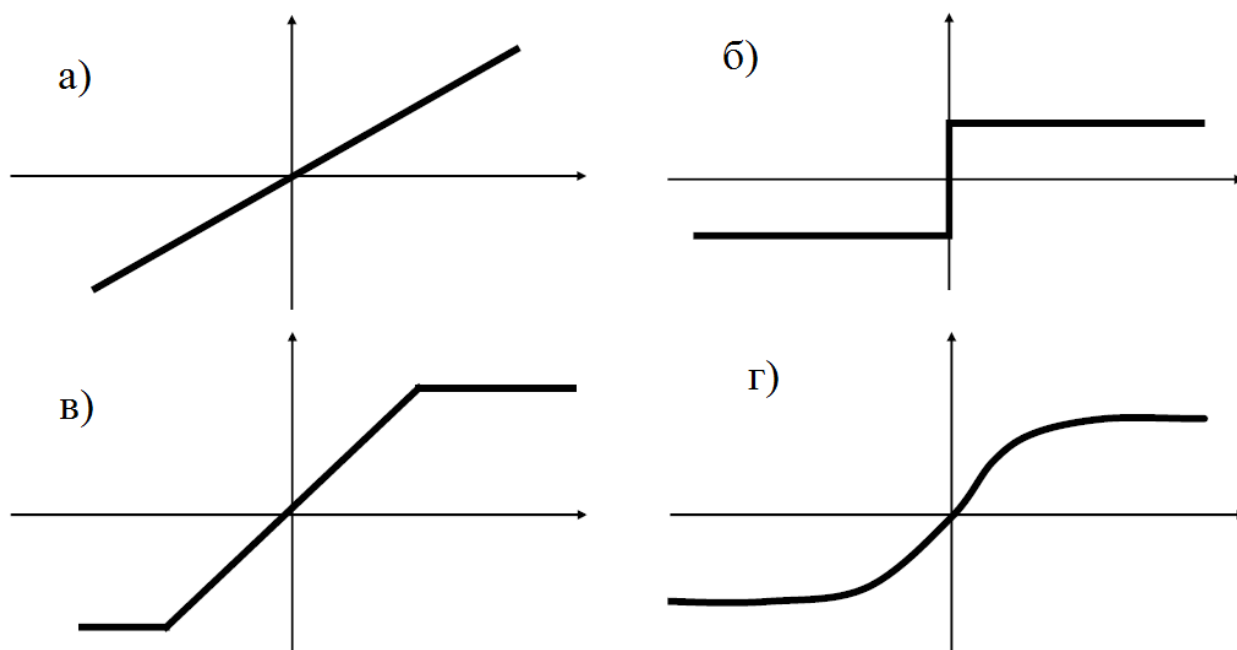


Слика 2.4. Једнослојна рекурентна мрежа

Са аспекта блискости природном процесу рекурентне мреже су ближе природи, међутим нерекурентне мреже имају једноставнију методологију учења, брже су и дају веома повољне резултате при решавању великог броја проблема. Понашање ВНМ у директној је вези са бројем неурона, њиховом повезаношћу тежинским коефицијентима, као и са активационим функцијама (слика 2.5). ВНМ на деловање средине реагују променом понашања по синапсама. Правила по којима се одвијају те промене су заправо процедуре учења, које може бити [64]:

- *Off-line* учење, где се мрежа обучава ван средине у којој ће радити. Средина се симулира скупом података за учење где је сваки узорак представљен паром улаз – жељени излаз. Скуп треба изабрати пажљиво тако да што верније презентује понашање средине. Када је одзив одговарајући појачања по синапсама се фиксирају и мрежа се ставља у експлоатацију. Како је скуп за учење подскуп скупа свих могућих стања, од научене мреже се очекује да да тачан одзив уколико се побуди улазом који није био у скупу за обучавање. Мрежа треба да генерализује проблем.
- *On-line* где се мрежа ставља у експлоатацију и учење се обавља на основу података који се добијају из радног окружења.

Процедуре учења могу бити статичке и динамичке. Код статичких учење се обавља променом тежинских коефицијената, а код динамичких се мења и архитектура. Конструисање ВНМ захтева решавање многих проблема који се односе на број скривених слојева, број неурона у сваком слоју, избор активационе функције неурона, као и избор скупа података за учење.



Слика 2.5. Активационе функције а) линеарна, б) одскачна, в) делимично линеарна и г) сигмоидна

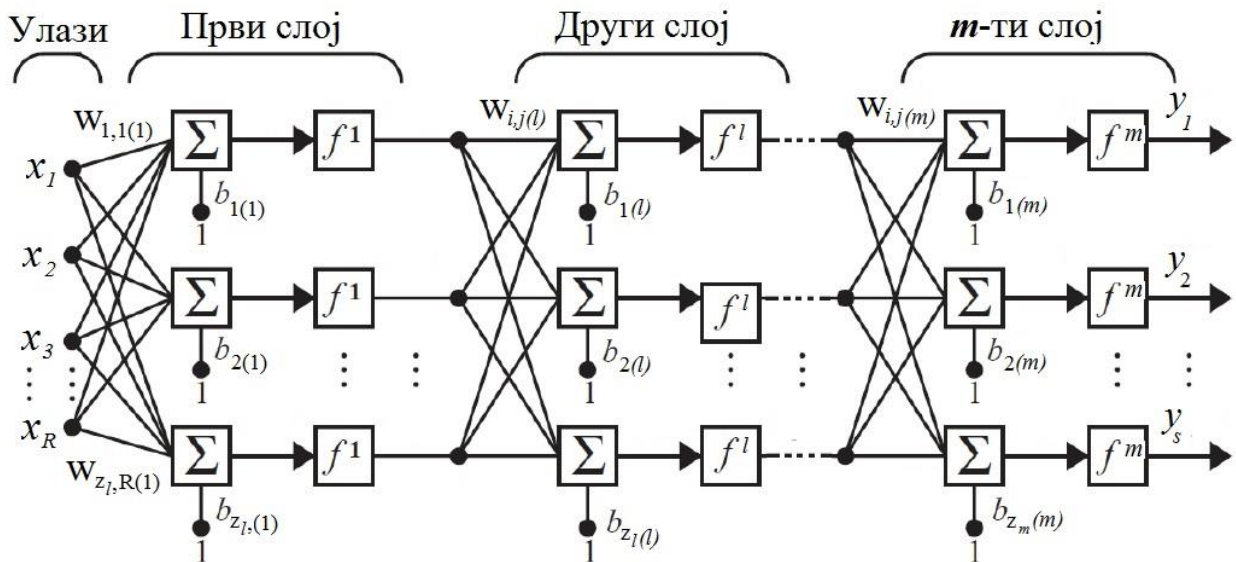
2.1.1. Вишеслојни перцептрон (Multilayer perceptron – MLP)

Како једнослојни перцептрон има ограничене могућности за решавање широког спектра проблема користи се вишеслојни перцептрон (*Multilayer perceptron*). У *MLP* мрежама се спољни слојеви, који примају и предају информације називају, респективно, улазним и излазним, док се унутрашњи слој назива скривеним. У литератури су ове мреже познате и као нерекурентне вишеслојне ВММ. На слици 2.6. дат је приказ вишеслојног перцептрона, а одговарајуће ознаке на слици имају следећа значења:

- $x_1 \dots x_R$ – улазни сигнали,
- m – број слојева у мрежи,
- z_l – број неурона у слоју,
- $w_{i,j(l)}$ – тежина везе између i – тог неурона у l – том слоју, и j – тог неурона у $l-1$ слоју,
- $b_{i(l)}$ – праг активације i – тог неурона у l – том слоју,
- f^l – активациона функција неурона у l – том слоју.

За обучавање ВММ приказане на слици 2.6. користи се алгоритам са пропацијом грешке уназад (*backpropagation algorithm*). Алгоритам развијен средином 80 – их, омогућио је нагли развој даљих истраживања и примене ВММ, а заснива се на процесирању грешке, тј. разлике између измерене и израчунате вредности са сваког излаза и њене пропације

према свим неуронима како би се на основу њене вредности кориговале тежине синапси. *Backpropagation algorithm* представља уопштени облик делта правила и ослања се на методу опадајућег градијента у процесу учења, тј. минимизацији грешке прилагођавањем тежинских коефицијената синапси ВМ [65-67]. Процес учења подразумева постојање скупа података за обучавање $P = (p_1, p_2, \dots, p_N)$, где је N укупан број елемената. Принцип функционисања приказане мреже дат је у наставку према [64].



Слика 2.6. Вишеслојни перцептрон

Сваки елемент поменутог скупа дефинисан је улазним вектором $x^{(k)} = [x_1^{(k)} x_2^{(k)} \dots x_R^{(k)}]^T$ и вектором жељеног излаза $t^{(k)} = [t_1^{(k)} t_2^{(k)} \dots t_R^{(k)}]^T$, тј. $p_k = (x^{(k)}, t^{(k)})$. Циљ учења је одређивање параметара мреже (тежина веза и прагова активације) таквих да $y^{(k)} = [y_1^{(k)} y_2^{(k)} \dots y_R^{(k)}]^T$ буде једнак $t^{(k)} = [t_1^{(k)} t_2^{(k)} \dots t_R^{(k)}]^T$. Излаз i -тог неурона у l -том слоју је:

$$v_{i(l)} = f_l(n_{i(l)}) \quad (2.1)$$

где је:

$$n_{i(l)} = \sum_{j=1}^{z_{l-1}} w_{i,j(l)} v_{j(l-1)} + b_{i(l)} \quad (2.2)$$

Излаз i -тог неурона у l -том слоју на k -ти улаз је:

$$v_{i(l)}^k = f_l(n_{i(l)}^k) \quad (2.4)$$

где је:

$$n_{i(l)}^k = \sum_{j=1}^{z_{l-1}} w_{i,j(l)} v_{j(l-1)}^k + b_{i(l)} \quad (2.5)$$

Излаз i – тог неурона у m – том слоју је уједно и i – ти излаз мреже:

$$v_{i(m)} = y_i = f_m(n_{i(m)}) \quad (2.6)$$

где је:

$$n_{i(m)} = \sum_{j=1}^{z_m} w_{i,j(m)} v_{j(m-1)} + b_{i(m)} \quad (2.7)$$

Критеријумска функција, која описује колико се стварни излаз мреже разликује од жељеног, дата је следећим изразом:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^s (t_i - y_i)^2 \quad (2.8)$$

Или:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^s (t_i - v_{i(m)})^2 \quad (2.9)$$

Када се на улаз доведе k – ти узорак скупа података за обучавање вредност функције дате (2.8) је:

$$E^{(k)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^s (t_i^{(k)} - y_i^{(k)})^2 \quad (2.10)$$

Или:

$$E^{(k)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^s (t_i^{(k)} - v_{i(m)}^{(k)})^2 \quad (2.11)$$

Минимизација функције (2.11) може се остварити градијентном методом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E^{(k)}}{\partial w_{i,j(m)}} &= (t_i^{(k)} - y_i^{(k)}) \left(-\frac{\partial v_{i(m)}^{(k)}}{\partial n_{i(m)}^{(k)}} \right) \frac{\partial n_{i(m)}^{(k)}}{\partial w_{i,j(m)}} \\ \frac{\partial E^{(k)}}{\partial b_{i(m)}} &= (t_i^{(k)} - y_i^{(k)}) \left(-\frac{\partial v_{i(m)}^{(k)}}{\partial n_{i(m)}^{(k)}} \right) \frac{\partial n_{i(m)}^{(k)}}{\partial b_{i(m)}} \end{aligned} \quad (2.12)$$

где је:

$$\frac{\partial v_{i(m)}^{(k)}}{\partial n_{i(m)}^{(k)}} = f'_m(n_{i(m)}^{(k)}), \quad \frac{\partial n_{i(m)}^{(k)}}{\partial w_{i,j(m)}} = v_{j(m-1)}^{(k)} \text{ и } \frac{\partial n_{i(m)}^{(k)}}{\partial b_{i(m)}} = 1 \quad (2.13)$$

Ако је активациона функција на пример сигмоидална тада је:

$$v_{i(m)}^{(k)} = \frac{1}{1 + e^{-n_{i(m)}^{(k)}}} \quad (2.14)$$

па је:

$$\frac{\partial v_{i(m)}^{(k)}}{\partial n_{i(m)}^{(k)}} = \frac{e^{-n_{i(m)}^{(k)}}}{\left(1 + e^{-n_{i(m)}^{(k)}}\right)^2} \quad (2.15)$$

Корекција тежина веза између неурона у $m-1$ и m – том слоју и прагова активације неурона у m – том слоју се обавља итеративним поступком:

$$w_{i,j(m)}(t+1) = w_{i,j(m)}(t) - \eta \frac{\partial E^{(k)}}{\partial w_{i,j(m)}} \quad (2.16)$$

$$b_{i(m)}(t+1) = b_{i(m)}(t) - \eta \frac{\partial E^{(k)}}{\partial b_{i(m)}}$$

Да би се кориговале вредности тежина веза између неурона у $m-1$ слоју и m – том слоју потребно је познавати излазе мреже и излазе неурона у $m-1$ слоја на k – ти улазни вектор. За корекцију прагова активације неурона у m – том слоју потребни су излази мреже на k – ти улазни вектор. Адаптација тежина веза и прагова активације неурона у осталим слојевима се одређује такође из услова да функција (2.11) буде минимална:

$$\frac{\partial E^{(k)}}{\partial w_{i,j(l)}} = \frac{\partial E^{(k)}}{\partial v_{i(l)}^{(k)}} \frac{\partial v_{i(l)}^{(k)}}{\partial n_{i(l)}^{(k)}} \frac{\partial n_{i(l)}^{(k)}}{\partial w_{i,j(l)}} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial E^{(k)}}{\partial b_{i(m)}} = \frac{\partial E^{(k)}}{\partial v_{i(l)}^{(k)}} \frac{\partial v_{i(l)}^{(k)}}{\partial n_{i(l)}^{(k)}} \frac{\partial n_{i(l)}^{(k)}}{\partial b_{i(l)}}$$

где је:

$$\frac{\partial v_{i(l)}^{(k)}}{\partial n_{i(l)}^{(k)}} = f_l' \left(n_{i(l)}^{(k)} \right), \frac{\partial n_{i(l)}^{(k)}}{\partial w_{i,j(l)}} = v_{j(l-1)}^{(k)} \text{ и } \frac{\partial n_{i(l)}^{(k)}}{\partial b_{i(l)}} = 1 \quad (2.18)$$

Параметри у $t+1$ кораку одређују се на следећи начин:

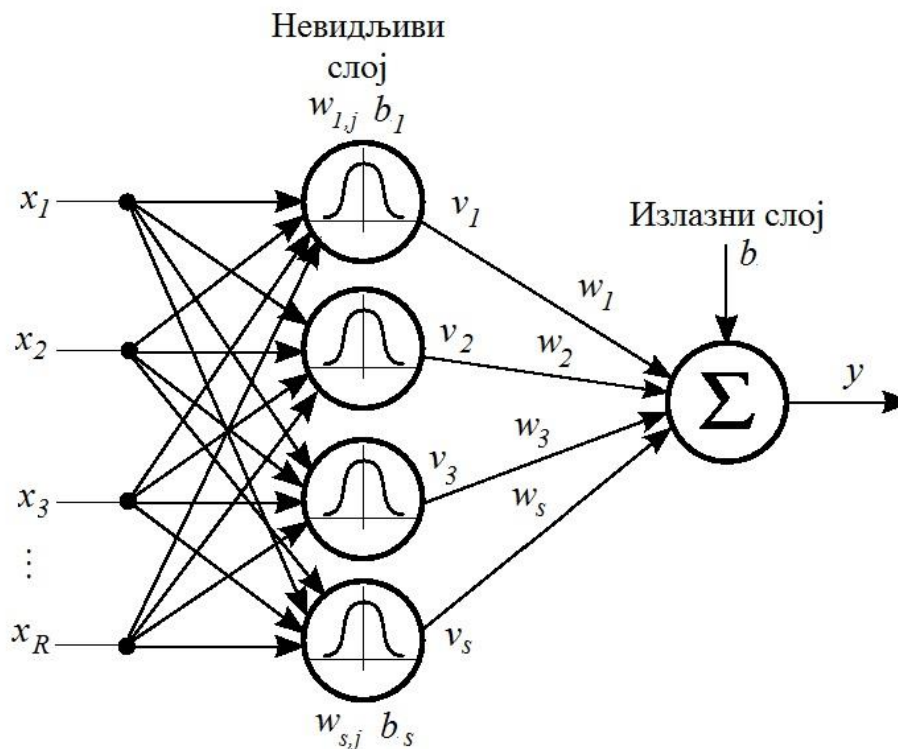
$$w_{i,j(l)}(t+1) = w_{i,j(l)}(t) - \eta \frac{\partial E^{(k)}}{\partial w_{i,j(l)}} \quad (2.19)$$

$$b_{i(l)}(t+1) = b_{i(l)}(t) - \eta \frac{\partial E^{(k)}}{\partial b_{i(l)}}$$

За одређивање нових вредности тежина веза између неурона у $l-1$ слоју и l – том слоју потребни су излази неурона из $l-1$ слоја. Модификација параметара вишеслојне ВММ приказане на слици 2.6. остварује се према једначинама (2.12), (2.16), (2.17), (2.19). Алгоритам базиран на овим једначинама зове се *backpropagation algorithm*, или алгоритам са пропацијом грешке уназад. Организован је у две фазе, тако да се у првој на улаз мреже доводи улазни вектор $x^{(k)} = [x_1^{(k)} x_2^{(k)} \dots x_R^{(k)}]^T$, и рачунају се излази свих неурона у мрежи. Ова фаза позната је као фаза простирања унапред. У следећој фази модификују се параметри мреже. Она почиње од излазног слоја. Прво се модификују тежине веза између неурона у m – том слоју и $m-1$ слоју и прагови активације неурона у m – том слоју према једначини (2.12) и (2.16). Ова фаза се назива фазом уназад.

2.1.2. Мрежа радијалних базисних функција (Radial Basis Function – RBF)

RBF вештачке неуронске мреже користе функцију радијалне основе као активациону функцију неурона. Постоји више функција које се користе као функције са радијалном основом (мултиквадратне, инверзне квадратне, инверзне мултиквадратне...), а једна од најчешће коришћених је Гаусова функција. На слици 2.7. дат је приказ модела *RBF* вештачке неуронске мреже са R улаза и једним излазом. Принцип функционисања приказане мреже дат је у наставку према [64].



Слика 2.7. Модел *RBF* вештачке неуронске мреже

Дакле, први слој је са Гаусовим функцијама активације. Излаз i – те невидљиве јединице је:

$$v_i = e^{-n_i}, i = 1, 2, \dots, s \quad (2.20)$$

где је:

$$n_i = \sum_{j=1}^R \frac{(x_j - w_{i,j})^2}{2b_i^2} \quad (2.21)$$

где су: $w_{i,j}$ и b_i центри и радијус Гаусових функција за i – ту невидљиву јединицу. Излаз мреже је:

$$y = \sum_{i=1}^s v_i w_i + b \quad (2.22)$$

где је: $w_{i,j(l)}$ – тежина везе између i – ту невидљиву јединицу и излаза, а $b_{i(l)}$ – праг активације излазног неурона.

Развијени су различити алгоритми учења неуронске мреже са слике 2.7. Параметри који се адаптирају су: $w_{i,j}$, b_i , w_i и b . Развијене методе учења подразумевају постојање скупа података за обучавање $P = (p_1, p_2, \dots, p_N)$. Сваки елемент поменутог скупа дефинисан је

улазним вектором $x^{(k)} = [x_1^{(k)} x_2^{(k)} \dots x_R^{(k)}]^T$ и вектором жељеног излаза

$t^{(k)} = [t_1^{(k)} t_2^{(k)} \dots t_R^{(k)}]^T$, тј. $p_k = (p^{(k)} t^{(k)})$. Излаз мреже када је на улазу k – ти улазни

вектор је:

$$y^{(k)} = \sum_{i=1}^s v_i^{(k)} w_i + b \quad (2.23)$$

где је:

$$v_i^{(k)} = e^{-\sum_{j=1}^R \frac{(p_j^{(k)} - w_{i,j})^2}{2b_i^2}} \quad (2.24)$$

Обично се за обучавање мреже примењује хибридна техника где се један алгоритам користи за прилагођавање $w_{i,j}$ и b_i , а други за w_i и b . У [68] за адаптацију параметара, којих има укупно $sR + 2s, (b=0)$, користи се алгоритам који се заснива на методи смањења градијента. Узет је проширен модел *RBF* мреже код кога се излаз рачуна као:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^s v_i w_i}{\sum_{i=1}^s v_i} \quad (2.25)$$

Излаз мреже када је на улазу k – ти улазни вектор је:

$$y^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^s v_i^{(k)} w_i}{\sum_{i=1}^s v_i^{(k)}} \quad (2.26)$$

Када се замени (2.24) у (2.26) добија се (2.27):

$$y^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^s e^{-\sum_{j=1}^R \frac{(p_j^{(k)} - w_{i,j})^2}{2b_i^2}} w_i}{\sum_{i=1}^s e^{-\sum_{j=1}^R \frac{(p_j^{(k)} - w_{i,j})^2}{2b_i^2}}} \quad (2.27)$$

Када се на улаз доведе k – ти узорак, грешка у одзиву мреже је:

$$e^{(k)} = t^{(k)} - y^{(k)} \quad (2.28)$$

Критеријумска функција је:

$$E^{(k)} = \frac{1}{2} [e^{(k)}]^2 \quad (2.29)$$

Минимизација функције (2.29) може да се оствари коришћењем итеративног поступка за прилагођавање параметара:

$$\begin{aligned} w_{i,j}(t+1) &= w_{i,j}(t) - \eta_w \frac{\partial E^{(k)}}{\partial w_{i,j}} \\ b_i(t+1) &= b_i(t) - \eta_b \frac{\partial E^{(k)}}{\partial b_i} \\ w_i(l+1) &= w_i(l) - \eta_w \frac{\partial E^{(k)}}{\partial w_i} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Центри Гаусових функција се адаптирају према:

$$w_{i,j}(t+1) = w_{i,j}(t) - \eta_w \frac{\partial E^{(k)}}{\partial y^{(k)}} \frac{\partial y^{(k)}}{\partial v_i^{(k)}} \frac{\partial v_i^{(k)}}{\partial w_{i,j}} \quad (2.31)$$

где је:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial E^{(k)}}{\partial y^{(k)}} &= -\left(t^{(k)} - y^{(k)}\right) \\
 \frac{\partial y^{(k)}}{\partial v_i^{(k)}} &= \frac{w_i \sum_{i=1}^s v_i^{(k)} - \sum_{i=1}^s v_i^{(k)} w_i}{\left(\sum_{i=1}^s v_i^{(k)}\right)^2} \\
 \frac{\partial v_i^{(k)}}{\partial w_{i,j}} &= v_i^{(k)} \frac{\left(p_j^{(k)} - w_{i,j}\right)}{b_i^2} \\
 w_{i,j}(t+1) &= w_{i,j}(t) - \eta_w \frac{\left(t^{(k)} - y^{(k)}\right)}{\sum_{i=1}^s v_i^{(k)}} \frac{p_j^{(k)} - w_{i,j}}{b_i^2} v_i^{(k)} \left(w_i - y^{(k)}\right)
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

Радијуси Гаусових функција се модификују према:

$$b_i(t+1) = b_i(t) - \eta_b \frac{\partial E^{(k)}}{\partial y^{(k)}} \frac{\partial y^{(k)}}{\partial v_i^{(k)}} \frac{\partial v_i^{(k)}}{\partial b_i} \tag{2.33}$$

где је:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial v_i^{(k)}}{\partial b_i} &= v_i^{(k)} \frac{\left(p_j^{(k)} - w_{i,j}\right)}{b_i^2} \\
 b_i(t+1) &= b_i(t) - \eta_b \frac{\left(t^{(k)} - y^{(k)}\right)}{\sum_{i=1}^s v_i^{(k)}} v_i^{(k)} \sum_{j=1}^R \frac{\left(p_j^{(k)} - w_{i,j}\right)^2}{b_i^3} \left(w_i - y^{(k)}\right)
 \end{aligned} \tag{2.34}$$

Тежине веза између невидљивих јединица и излаза се адаптирају према:

$$w_i(t+1) = w_i(t) - \eta_w \frac{\partial E^{(k)}}{\partial y^{(k)}} \frac{\partial y^{(k)}}{\partial w_i} \tag{2.35}$$

$$w_i(t+1) = w_i(t) - \eta_w \frac{\left(t^{(k)} - y^{(k)}\right)}{\sum_{i=1}^s v_i^{(k)}} v_i^{(k)} \tag{2.36}$$

Итеративни поступак заснован на једначинама (2.31), (2.33), (2.36) обавља се док грешка дата изразом (2.28) не постане мања од унапред задате вредности. Са овом процедуром учења, као што је дато у [68], велики број итерација је потребан да грешка у одзиву мреже буде прихватљиво мала. *RBF* мрежа може успешно да буде обучена динамичком процедуром учења, где се, осим параметара у процесу учења, мења и архитектура мреже. Одређивање топологије се своди на одређивање броја неурона у скривеном слоју. У [66] је

показано да *RBF* мрежа успешно може да се обучи ако је број невидљивих јединица једнак броју елемената скупа података за обучавање:

$$w_{i,j} = x_j^{(i)}; i = 1, 2, \dots, N; j = 1, R \quad (2.37)$$

и ако се прилагођавање тежина веза користи алгоритам заснован на методи најмањих квадрата, а ако се узме да су радијуси Гаусових функција константни. Међутим, уколико је N велико невидљиви слој би садржао велики број неурона, што отежава практичну имплементацију. Мрежа може да генерализује проблем и ако је:

$$w_{i,j} = x_j^{(l)}; i = 1, N_1; j = 1, R, l \text{ било који број од } 1 \text{ до } N \text{ и } N_l < N \quad (2.38)$$

Избор $x^{(l)}$ из скупа података за обучавање који ће се доделити центрима Гаусових функција може да буде слободан или могу да се користе одређени критеријуми за избор $x^{(l)}$ који се додељује w_i . Параметри који се адаптирају код динамичке процедуре учења су $w_{i,j}$, w_i и b . Радијуси гаусових функција се не адаптирају и исти су за све јединице невидљивог слоја. Алгоритам почиње са учењем мреже минималне конфигурације, односно са мрежом са једним неуроном у невидљивом слоју. Детаљан приказ овог сложеног алгоритма дат је у [66].

2.2. МЕТОДЕ ГЛОБАЛНЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ

Задатак оптимизације је проналажење променљивих при којима циљна (критеријумска) функција има екстремну (минималну или максималну) вредност, уз ограничења којима се дефинише простор потенцијалних решења. Оптимизација је саставни део природних процеса. Од феномена који се одвијају на нивоу микроразмере (нпр. кристализација у којој молекули заузимају положај минимума енергије), до процеса еволуције у којој се кроз принцип преживљавања најспособнијих (*survival of the fittest*) долази до јединки које су све боље адаптиране на услове у “окружењу”. Методе глобалне оптимизације засноване су на идеји да се, имитирањем природе, покуша са проналажењем оптимума сложених функција више променљивих, које представљају математичку апстракцију сложеног инжењерског проблема.

2.2.1. Генетски алгоритми

Генетски алгоритам (ГА) је хеуристичка метода глобалне оптимизације, случајног и усмереног претраживања простора решења која имитира природни еволутивни процес.

Основе генетских алгоритама је предложио *John Holland* 1962. Постоји више техника које се при решавању проблема заснивају на Дарвиновој теорији еволуције. Поред генетских алгоритама слични приступи су еволутивно програмирање, еволутивне стратегије и генетско програмирање. Сви претходно побројани приступи спадају у групу еволутивних алгоритама. Еволутивне стратегије имају пуно заједничких особина са генетским алгоритмима. Основна разлика између еволутивних стратегија и генетских алгоритама је домен њихове примене [69,70]. Детаљан и веома важан опис функционисања механизма ГА дат је у референцама [71-75]. Генетски алгоритам имитира еволутивни процес у природи. За еволутивни процес важи да [70]:

- постоји популација јединки,
- неке јединке су боље,
- боље јединке имају већу вероватноћу преживљавања и репродукције,
- својства јединки су записана у хромозомима помоћу генетског кода,
- потомци наслеђују својства родитеља,
- над јединком може деловати мутација.

У најширем смислу ГА је алгоритам заснован на некој популацији, функцији циља као мерилу квалитета сваке јединке популације и генетским операторима који служе за добијање нових тачака у простору претраге. На самом почетку се генерише почетна популација јединки (хромозома), најчешће произвољним избором решења из домена претраге. За свако решење се одређује мера квалитета употребом функције циља или како се још назива функцијом добротe (*fitness function*). На тај начин се из старе популације формира нова издвајајући, по неком поступку одабира, боље јединке, из скупа постојећих. Неки чланови новонастале популације подвргнути су деловању генетских оператора који могу бити различитог карактера. Тако неки оператори стварају нову јединку мењајући мањи део њеног генетског материјала, а неки омогућују стварање нове јединке комбинујући генетске материјале јединки из минуле генерације. Након неколико генерација процес се зауставља када је задовољен један од услова, а најбољи члан тренутне (последње) генерације представља решење оптимизационог процеса.

Код конвенционалних генетских алгоритама све су промелјиве бинарно кодирани и јединка заједно чини један бинарни низ. Бинарни низови чине хромозом без обзира на природу самих променљивих. При претраживању континуалног простора за оптималним решењем бинарно кодираним генетским алгоритмом јављају се разне потешкоће. У циљу превазилажења ових потешкоћа последњих година развијени су и примењују се реално кодирани генетски алгоритми, који се у литератури називају још и континуални генетски

алгоритми, код којих су променљиве представљене реалним бројевима. Употреба реално кодираних променљивих у генетском алгоритму доноси бројне предности у односу на бинарно кодиране. Ефикасност генетских алгоритама је повећана јер нема потребе за додатном конверзијом променљивих у бинарне бројеве и обратно, мање меморије је потребно за прорачун, постиже се већ прецизност јер нема губитака тачности који се јављају при дискредитацији у бинарне вредности и постоји већа слобода употребе различитих генетских оператора [69].

Фитнес функција је функција коју желимо да оптимизујемо. У литератури има и назив функција циља, функција добротe, функција способности или евал функција. Њоме се остварује оцена квалитета јединке. Постоји више начина за дефинисање функције циља. За задати оптимизациони проблем највећу потешкоћу представља дефинисање функције циља. Она треба верно да одражава проблем који се решава. При томе оптимизациони алати покушавају да нађу минимум/максимум функције циља. Јединка је свака тачка на коју можемо применити фитнес функцију. Вредност фитнес функције за једну јединку је њен резултат (*score*). Уколико генетски алгоритам примењујемо за тражење глобалног минимума функције једне променљиве x у интервалу $[x_{min}, x_{max}]$ тада се једно решење $x \in [x_{min}, x_{max}]$ представља једном јединком, односно једним хромозомом. За генетски алгоритам је значајно да хромозом представља могуће решење задатог проблема. На пример, ако је фитнес функција [69]:

$$f(x_1, x_2, x_3) = (2x_1 + 1)^2 + (3x_2 + 4)^2 + (x_3 - 2)^2 \quad (2.39)$$

вектор $(2, -3, 1)$, чија дужина одговара броју променљивих у проблему, представља једна јединка. Резултат јединке $(2, -3, 1)$ је $f(2, -3, 1) = 51$. Једна јединка се често назива геном, а векторски параметри који је карактеришу се називају гени. Популација је низ јединки. На пример, ако је величина популације 100, а број променљивих фитнес функције 3, популација је представљена матрицом 100×3 . Иста јединка се може појавити више пута у популацији. На пример, јединка $(2, -3, 1)$ се може појавити у више колона матрице. При свакој итерацији генетски алгоритам извршава серије прорачуна на тренутно актуелној популацији, како би произвео нову популацију. Свака успешна популација се назива нова генерација [69]. Након процене ваљаности сваке јединке тренутне генерације формира се нова генерација применом генетских оператора.

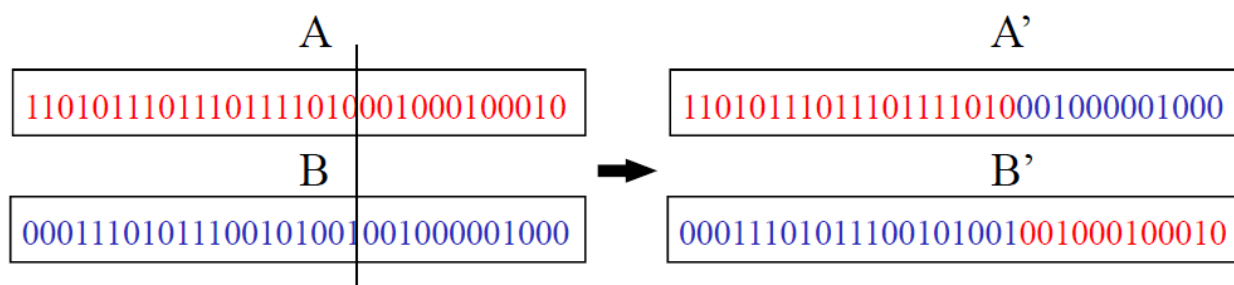
Сврха селекције је чување и преношење добрих својстава на следећу генерацију јединки. Селекцијом се одаберу добре јединке које учествују у наредном кораку, у репродукцији. На тај начин се добри гени или добар генетски материјал, чувају и преносе у следећу популацију, а лоши одумиру. Генетски алгоритми, с обзиром на врсту селекције,

деле се на генерацијске и елиминацијске. Генерацијски генетски алгоритам у једној итерацији располаже с две популације (што је уједно и недостатак генерацијског ГА), јер се одаберу добре јединке из старе популације које чине нову популацију и након селекције учествују у процесу репродукције. Карактеристичне врсте селекција које користи генерацијски ГА су: једноставна селекција и турнирска селекција. С друге стране елиминацијска селекција је карактеристика елиминацијског генетског алгоритма (*GA with steady-state reproduction*). Једноставна селекција генерише нову популацију $P(t)$ која има исти број чланова као популација претходне генерације $P(t-1)$. Циљ једноставне селекције је одабир родитеља чија је шанса за вишеструким учешћем у новој генерацији пропорционална њиховој доброту оценом функцијом циља. Ова врста селекције, свакако омогућује вишеструко учешће одређених хромозома у наредној популацији. Турнирском селекцијом се у сваком кораку генерише нова популација из старе популације тако да се N пута (где је N величина популације) одабере једнаком вероватноћом k јединки из старе популације, а најбоља улази у групу намењену репродукцији. За разлику од једноставне селекције, елиминацијска селекција (*steady-state selection*) не бира добре хромозоме за наредну популацију, већ лоше које треба елиминисати и репродукцијом их заменити новима.

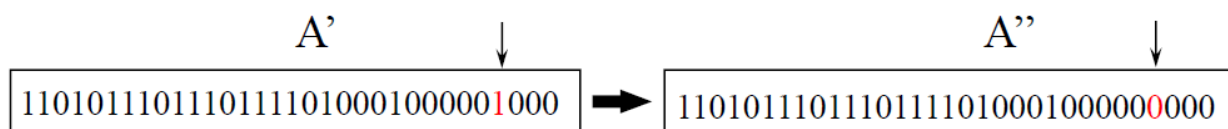
Потенцијална опасност ГА процеса је да се добро решење добијено великим бројем итерација изгуби уколико га генетски оператори (нпр. мутација или селекција) измене. Стога се јавља потреба за механизмом заштите најбоље јединке од било какве измене или елиминације током еволуцијског процеса. Такав механизам се назива елитизам. Генетски алгоритам с уграђеним елитизмом, из генерације у генерацију, асимптотски тежи ка глобалном оптимуму, односно решењу проблема. Међутим, да би у сваком кораку еволуције заштитили најбољу јединку од било каквих измена или елиминације, потребно ју је у сваком кораку и пронаћи. Претраживање или сортирање захтева процесорско време због кога се може знатно успорити рад ГА.

Процес укрштања (*crossover*) подразумева учешће две јединке које се називају родитељи. Укрштањем настаје једна или две нове јединке које се називају деца (Слика 2.8). Може бити дефинисано са произвољним бројем прекидних тачака. Најважнија карактеристика укрштања јесте да деца наслеђују својства својих родитеља. Ако су родитељи добри (прошли су процес селекције), тада ће највероватније и дете бити добро, ако не и боље од својих родитеља.

Мутација, или случајна промена једног или више гена, делује над једном јединком, а резултира измењеном јединком над којом је извршена (Слика 2.9).



Слика 2.8. Принцип укрштања



Слика 2.9. Принцип мутације

Прекид генетског алгоритма одређују следећи параметри:

- Број генерација – алгоритам се зауставља када број генерација достигне унапред дефинисану вредност.
- Временско ограничење – алгоритам се завршава када се достигне унапред дефинисано време трајања оптимизације у секундама.
- Гранична вредност фитнес функције – када вредност фитнес функције за најбољу тачку у тренутно актуелној популацији достигне задату граничну вредност.
- Стагнирање генерација – алгоритам се зауставља када средње промене у вредности функције циља буду мање од дозвољене вредности – толеранције.
- Временско стагнирање – алгоритам се зауставља ако нема напретка у вредности фитнес функције за време неког унапред дефинисаног временског интервала.
- Толеранција функције – дозвољено одступање вредности фитнес функције (толеранција).

Да би се остварили бољи резултати генетског алгоритма обично је потребно експериментисати са различитим опцијама. Избор најбољих опција подразумева испробавање и појаву грешке. Један од најважнијих фактора који одређује перформансе генетског алгоритма је разноликост популације. Ако је средње растојање између јединки велико, разноликост је висока; ако је средње растојање мало, разноликост је ниска. Ако је разноликост превише висока или превише ниска, генетски алгоритам неће бити довољно квалитетан. Повећање величине популације омогућава генетском алгоритму да претражује више тачака и на тај начин добије боље резултате. Међутим, с друге стране, повећање величине популације изазива повећање времена потребног за извођење генетског алгоритма за сваку генерацију. Скалирање фитнес функције конвертује редове фитнес

резултата као одзива на фитнес функцију у низ вредности које су прилагођене селекцији. Функција селекције користи скалиране фитнес вредности како би селектовала родитеље за стварање следеће генерације. Селекциона функција додељује већу могућност селекције јединкама са већом скалираном вредношћу. Опсег скалираних вредности утиче на перформансе генетског алгоритма. Ако су скалиране вредности у врло широком опсегу јединке са вишом вредношћу репродукују се много више, убрзо доминирају популацијом, онемогућавајући алгоритму претраживање других области на простору за претраживање. С друге стране, ако је опсег скалираних вредности врло мали, све јединке имају готово исте шансе за репродукцију и претраживање ће напредовати врло споро. Због тога што алгоритам минимизира фитнес функцију нижи редови резултата имаће већу скалирану вредност [69].

2.2.2. Оптимизација ројем честица

Оптимизација ројем честица (*Particle Swarm Optimisation – PSO*) је стохастички алгоритам који се базира на популацији решења. Припада групи алгоритама интелигенције роја (*Swarm intelligence*) који се темеље на социолошко-психолошким принципима и пружају увид у социолошка понашања, и помоћу њих доприносе инжењерским апликацијама. Осмислили су га двојица научника: *James Kennedy* и *R. C. Eberhart* не тако давне 1995. године. Мотивацију су пронашли у друштвеном понашању разних типова организама попут јата птица или јата риба. Технике програмирања су од тада увелико унапређене, а оригиналан алгоритам је готово и непрепознатљив у односу на данашње верзије [77]. Постоји више различитих мишљења о томе на који начин *PSO* може да врши оптимизацију. Уобичајено мишљење међу истраживачима је да понашање јата варира између два облика [78]. Први облик понашања је истраживачко понашање, тј. претраживање граница простора у којем се траже решења. Други облик понашања је експлоатацијско понашање које представља локално оријентисану претрагу и кретање ка оптималном решењу које може бити глобалног али и локалног карактера. *PSO* алгоритам и његови параметри морају бити тако одабрани да су подједнако заступљена оба облика понашања, како би се избегла прерана конвергенција ка неком локалном оптимуму, а у исто време да би се задржала могућност проналаска глобалног оптимума и добра брзина кретања ка њему [79]. *PSO* се иницијализује скупом случајно генерисаних решења (рој честица) у дозвољеним границама. Тренутна позиција честице у простору решења представља једно решење. Свака честица у роју (популацији) је у сваком тренутку представљена својом позицијом (x у једначинама (2.40) и (2.41)) и брзином (v у једначинама (2.40) и (2.41)). Позиција сваке честице је потенцијално решење и најбоља

позиција коју је свака честица постигла током целог процеса оптимизације се памти. У сваком кораку алгоритма позиција и брзина сваке честице се ажурира са две „најбоље“ вредности. Прва представља најбоље решење које је та честица постигла досад (p у једначини (2.40)). Друга вредност представља глобално најбоље решење (погодност) које је постигла било која честица у популацији икада (g у једначини (2.40)) [80]. Када су срачунате те две најбоље вредности (p и g), брзина v и нова позиција x се у k -тој итерацији прерачунавају по једначинама:

$$v(k+1) = w \cdot v(k) + cp \cdot rp(k) \cdot (p(k) - x(k)) + cg \cdot rg(k) \cdot (g(k) - x(k)) \quad (2.40)$$

$$x(k+1) = x(k) + v(k+1) \quad (2.41)$$

где су:

- $v(k)$ – брзина честице у итерацији k ;
- $x(k)$ – позиција честице (решење) у итерацији k ;
- $p(k)$ – лично најбоље решење честице;
- $g(k)$ – глобално најбоље решење, у целој популацији;
- rp и rg – псеудо-случајни бројеви у опсегу $[0, 1]$;
- w , cp , cg – тежински фактори.

Тежински фактори cp и cg у једначини (2.40) представљају факторе убрзања и утичу на релативни утицај личног (локалног) и заједничког (глобалног) знања на кретање сваке честице. Често се каже да они представљају когнитивну (сазнајну) и социјалну компоненту, тим редом. У ствари фактори убрзања одређују колико брзо ће се честице кретати према оптималном решењу и колики ће утицај имати $p(k)$ и $g(k)$. Фактор инерције w , који је први пут уведен у [78] одржава јато на окупу и спречава га од претеране диверсификације која би умањила добре особине PSO алгоритма и претворила га у чисту случајну претрагу. Случајни бројеви rp и rg су међусобно независни и униформно распоређени на опсегу $[0, 1]$. У наставку је приказан псеудо код основне варијанте PSO алгоритма.

1) За сваку честицу

a. Постави почетне вредности честице (иницијализација)

2) Понављај

a. За сваку честицу

a1. Израчунај вредност критеријумске функције

a2. Ако је вредност критеријумске функције боља од најбоље вредности те честице до сада (p), постави тренутну вредност као ново p

б. Ако је најбоља вредност критеријумске функције у популацији боља од глобалне најбоље до сада (g), постави ново g

в. За сваку честицу

в1. Израчунај брзину честице на основу једначине брзине (2.40)

в2. Примени ограничења брзине

в3. Ажурирај позицију честице на основу једначине позиције (2.41)

в4. Примени ограничења позиције

3) Док није достигнут максималан број итерација или нађена жељена минимална граница критеријума.

Прве две линије, *1)* и *а)* кода користе се за иницијализацију роја честица. За сваку од честица се по неком алгоритму (или на случајан начин) бирају почетне вредности параметара. *2)* представља почетак главне петље програма. Програм се извршава док се не достигне максимални задати број итерација или се задовољи неки други критеријум заустављања који се задаје на почетку извршавања програма. *2) а)* представља почетак петље у којој се налази део кода за рачунање критеријумске функције за сваку јединку *2) а. а1.* После тога се врши поређење израчунате критеријумске функције са најбољом раније израчунатом вредношћу за одређену честицу *2) а. а1.)* и уколико је нова вредност боља од старе поставља се као најбоља до сад. Ова вредност представља лично најбоље решење честице. У *2) б.* се међу најбољим личним решењима бира најбоље глобално у тој итерацији и поставља као нова глобална најбоља вредност. *2) в.* представља почетак петље у којој се за сваку честицу појединачно врши израчунавање нове брзине *2) в. в1.* и нове позиције *2) в. в3.* Ове две вредности се рачунају на основу горе наведених формула (2.40) и (2.41) [79].

2.3. ФАЗИ СИСТЕМИ

Концепт фази логике представио је *Lotfi A. Zadeh*, професор на Универзитету у Калифорнији, промовишући га као начин обраде података, тако што се дозвољава делимична припадност неком скупу уместо јасне припадности или неприпадности [81]. Концепт фази логике имао је противнике који су сматрали да не постоји неизвесност и неодређеност која се на бољи начин може решити применом фази логике од примене теорије вероватноће. Темелј фази логике представља разматрање професора *Zadeh* – а, којим прави компарацију прецизности и релевантности. Коришћењем једноставних примера из свакодневног живота показао је да постоје ситуације у којима прецизност и релевантност могу бити потпуно узајамно искључиве карактеристике. Фази поглед на свет

управо узима у обзир једноставне и човеку јасне лингвистичке квалификације појава и покушава да их анализира и практично употреби. Сам појам “фази” значи нешто непрецизно, нејасно, мутно, расплинато. Неке од предности фази логике дате су у [82]:

- Концептуално једноставна за разумевање – математички концепт фази резоновања је једноставан због природе приступа фази логике заснованог на принципу здравог разума.
- Флексибилна – сваки систем је једноставно кориговати без потребе враћања на почетак.
- Толерише непрецизне податке – све је непрецизно ако се посматра површно, али и више од тога, већина ствари су непрецизне, расплинуте упркос пажљивом проучавању. Фази резоновање уграђује такво размишљање у сам процес.
- Може моделовати нелинеарне функције – постоји могућност креирања фази система који се прилагођава било каквом скупу улазних и излазних података.
- Базирана је на природном језику – основа фази логике је и основа људске комуникације. Природни језик који користе људи у својој свакодневној комуникацији је мењан и оптимизован хиљадама година.

Три кључна елемента помоћу којих фази логика моделује неодређеност у одлучивању су:

- Функције припадности.
- Операције фази логике.
- Фази правила за закључивање.

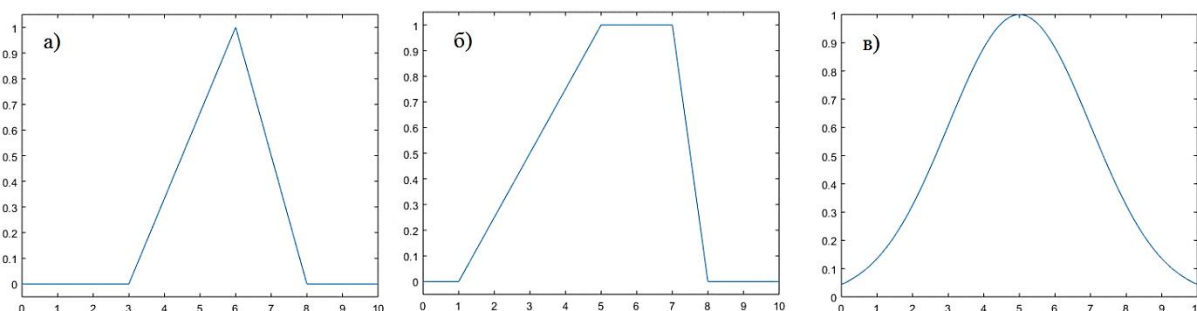
У класичној теорији скупова припадност неког елемента x скупу A дефинише се карактеристичном функцијом:

$$\mu_A(x) = \{1, x \in A; 0, x \notin A\} \quad (2.42)$$

Фази скупови немају тако јасно изражене, искључиве границе, већ је код њих могуће нумерички изразити реалним бројем у интервалу од 0 до 1, да ли неки елемент припада скупу и у којој мери. Фази скуп A одређен је функцијом припадности $\mu_A(x)$ која сваком елементу додељује реалан број из интервала (0, 1). Фази скуп се представља уређеним паром:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (2.43)$$

Где је U универзални скуп који садржи све објекте са степеном припадности 1. Типични облици функција припадности су: монотono опадајућа или растућа, троугаона, трапезна, Гаусова функција итд.

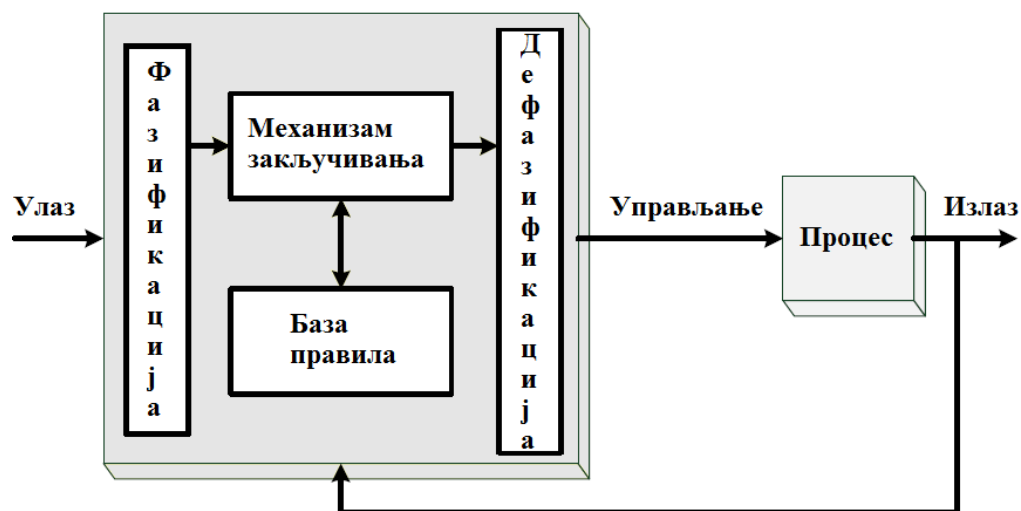


Слика 2.10. а) троугаона, б) трапезна и в) Гаусова функција припадности

Операције фази логике служе да израчунају истинитосну вредност сложеног исказа, насталог комбинацијом више простих исказа помоћу логичких оператора као што су то “и” и “или”. Искрпно објашњење операција над фази скуповима дато је у [64]. Фази правила за закључивање описују понашање система када лингвистичке променљиве имају различита стања тј. различите лингвистичке вредности. Тако, на пример, лингвистичке вредности лингвистичке променљиве *температура* (*ниска, погодна, висока*) и лингвистичке променљиве *промена температуре* (*опада, стабилна, расте*) утичу на лингвистичку вредност применљиве која представља излаз, а то је *проток* (*смањи, одржавај, повећај*). У зависности од начина на који је реализован излаз тј. у зависности од последичног дела правила (узрочни део правила се не разликује) фази системи се грубо могу поделити на: *Mamdani* [83, 84], *Takagi - Sugeno - Kang (TSK)* [85, 86] и *Tsukamoto* [87]. Мамдани тип ФИС-а на излазу даје фази скуп, па је самим тим, потребно да користи неку од техника дефазификације фази излаза. Сугено тип не захтева дефазификацију јер је излаз класичан (енгл. *crisp*) број и (најчешће) користи тежинску суму за агрегацију појединачних излаза.

Фази управљачки системи конструисани су тако да опонашају и моделују људско искуство и деловање при одлучивању. Фази управљање обезбеђује формалну методологију за представљање, манипулацију и имплементацију људског знања о контроли система [88, 89]. Према [90] четири основне компоненте у конфигурацији фази логичког контролера су:

- Фазификациони интерфејс који врши трансформацију улазних података у фази вредности.
- База правила у облику *АКО – ОНДА*.
- Логика одлучивања (механизам закључивања).
- Дефазификација (Слика 2.11).



Слика 2.11. Основна структура фази контролера [79]

Блок *Фазификација* обавља следеће задатке:

- Мерење вредности улазних величина.
- Пресликавање којим се трансформише опсег вредности улазних величина у универзални скуп.
- Трансформација улазних података у фази скупове.

Према [91] постоје три начина за фазификацију:

- Оператор фазификације конвертује прецизну вредност у фази синглетон, и то је најчешће примењивани начин због лаке имплементације.
- Оператор фазификације конвертује стохастичке податке у фази бројеве када су улазне вредности поремећене шумом.
- Оператор фазификације користи концепт хибридних бројева.

Величина базе фази правила зависи од броја фази скупова. Велики број фази скупова компликује процесирање, док са друге стране мали број смањује тачност. Процес пројектовања базе правила обухвата избор улазних и излазних променљивих базе правила, затим типова правила, избора садржаја управљачких правила. Такође према [91] постоје четири метода на бази којих се формирају правила:

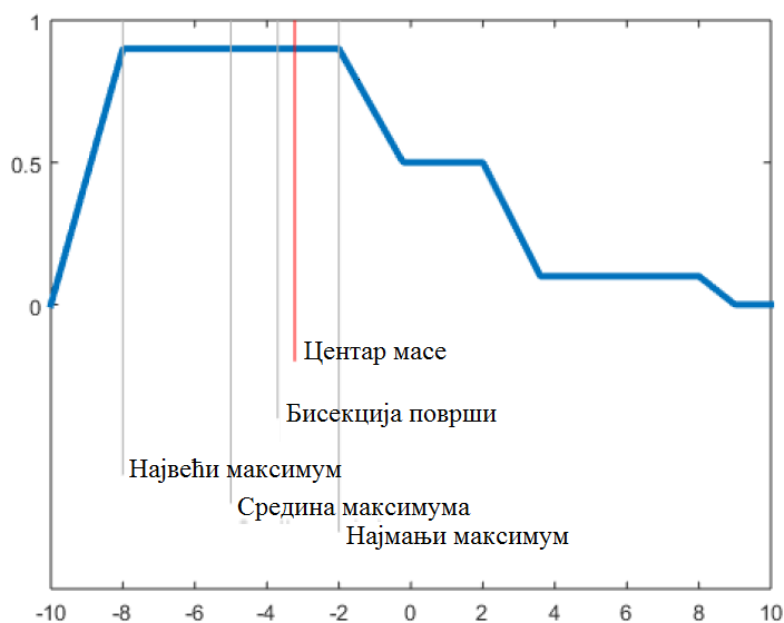
- Формирање базе правила које се базира на експертском искуству и познавању теорије управљања. Оптимално дефинисање правила се остварује пробом.
- Формирање базе правила моделирањем акције оператора. Неким сложеним системима управља вешт оператор на бази сопственог искуства и познавања процеса, и у складу са његовим акцијама формулишу се фази правила.

- Формирање фази правила на основу фази модела процеса, који је лингвистички опис динамичких карактеристике.
- Формирање базе правила на основу обучавања. Фази контролер садржи две базе, једну општу и једну са улогом надзорника за креирање и модификацију опште базе правила са циљем постизања жељених перформанси.

Логика одлучивања има задатак да одреди фази вредности излаза из система. Њена суштина је у избору дефиниције фази импликације и избора метода фази резоновања.

Дефазификација представља процес којим се резултујући фази скуп конвертује у реални број, због потребе да се у многим практичним апликацијама користи дискретна вредност управљања. Најчешће коришћени методи дефазификације (Слика 2.12) су:

- Центар масе
- Бисекција површи (метода половљења површи)
- Најмањи максимум
- Средина максимума
- Највећи максимум.

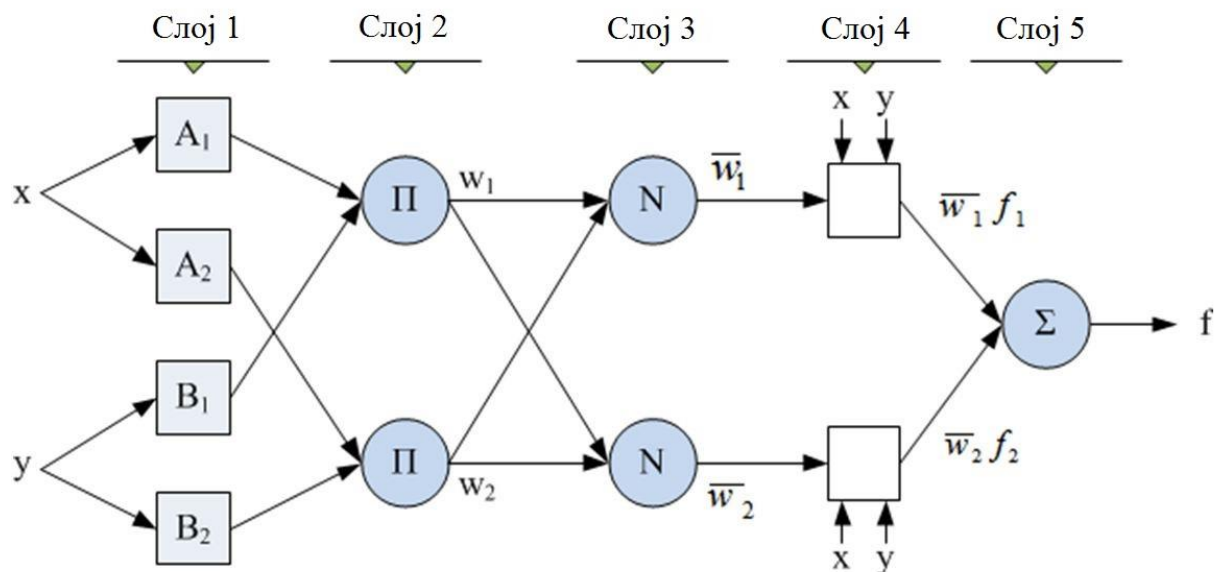


Слика 2.12. Методе дефазификације [88]

Поређењем метода дефазификације, у литератури [91 – 94] се наводи да је „центар масе“ најбоље компромисно решење, док „средина максимума“ даје највероватније решење. Примери примене фази контролера су бројне, а неке за ову дисертацију значајне индустријске примене дате су у [95]. Оно што је чињеница и што свакако треба нагласити је да се овај поступак пуно пута доказао у пракси као адекватан алат у процесу доношења управљачких одлука.

2.4. НЕУРО – ФАЗИ СИСТЕМИ – ANFIS

У процесу пројектовања фази логичког контролера посебан изазов представља дефинисање базе правила и избор функција припадности фази скупова. Поменути изазов је преточен у акцију многих истраживача који су покушали да аутоматизују моделирање фази контролера у том смислу. Комбинација неуронских мрежа и фази логике се показала као веома успешан приступ у изградњи фази система. Велика могућност примене и сам развој неуро-фази система заснивају се, с једне стране, на интеграцији, способности учења својствених неуронским мрежама и, са друге стране, на транспарентности и интерпретабилности својствених фази системима [96]. У анализираним и коришћеним литературним изворима издваја се литературни извор [97], у коме је дат исцрпан преглед досадашњег стања у области. *Jang* (1993) предлаже *ANFIS* (енгл. *Adaptive Network based Fuzzy Inference System*) који је, као најчешће коришћени неуро-фази модел, употребљен и у овој дисертацији [98]. Веома лако се имплементира, а могућност широке примене у најразличитијим апликацијама промовисала га је да буде део *Matlab Fuzzy Logic Toolbox*. Он дефинише *ANFIS* као класу адаптивних мрежа, које су функционално еквиваленте фази закључивању, при чему се користе предности и неуронских мрежа и фази логике. И фази резонување и калкулације које реализује неуронска мрежа одвијају се симултано [99]. Оно што краси овај систем је адаптивност, јер његове функције припадности изводе се на основу података који описују понашање система датих преко улазно-излазних променљивих система. Опис принципа функционисања *ANFIS* – а, преузет је из [98, 100]. На слици 2.13. дат је приказ архитектуре *ANFIS* – а од пет слојева, у којој сваки слој има недвосмислено одређену улогу.



Слика 2.13. Архитектура *ANFIS* - а

Слој 1: Сваки чвор овог слоја је квадратни чвор и обавља функцију:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x), i = 1, 2, 3... \quad (2.44)$$

где је x улаз у чвор i , а A је лингвистички појам (енгл. *linguistic label*) као на пример (мало, велико, ...) која је везана са дату функцију чвора. Другим речима, O је заправо вредност функције припадности A која означава у којој мери дато x припада фази скупу A_i . Функције припадности се могу представити различитим облицима (троугаона, трапезоидна или било која друга континуална, део по део диференцијабилна функција). Најчешће коришћена је звонаста функција са максималном вредношћу у 1 и минималном у 0:

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (2.45)$$

при чему је $\{a_i, b_i, c_i\}$ скуп параметара који се односе на премису правила а које је потребно оптимизовати кроз процес учења.

Слој 2: сваки чвор овог слоја је кружни и означен је са Π , а његов задатак је да множи улазне сигнале и затим их прослеђује следећем слоју.

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(x), i = 1, 2, 3... \quad (2.46)$$

Излаз из сваког чвора представља укупну јачину правила. Уместо множења овде се могу применити и други оператори који реализују генерализовано *AND*.

Слој 3: Чворови овог слоја су кружни и означени са N . Њихов задатак је да врше израчунавања којима се добија нормализована јачина i -тог правила.

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2, 3... \quad (2.47)$$

За сваки чвор рачуна се рацио, као однос јачине i -тог правила према суми јачина свих осталих правила.

Слој 4: Сваки чвор i , овог слоја је квадратни чвор, који обавља функцију:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i), i = 1, 2, 3... \quad (2.48)$$

где је \bar{w}_i излаз из претходног слоја 3 док су p_i, q_i, r_i скуп параметара који се односе на закључак.

Слој 5: Представљен је кругом и рачуна укупни излаз као суму свих улазних сигнала.

$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}, i = 1, 2, 3... \quad (2.49)$$

Процес учења код *ANFIS* - а односи се на подешавање параметара унутар непроменљиве структуре и броја слојева. *ANFIS* користи хибридни алгоритам који комбинује *backpropagation* методу најстрмијег спуста (енгл. *backpropagation gradient descent*) и методу најмањих квадрата како би се креирао фази систем закључивања који је способан да учи (функције припадности се итеративно подешавају на основу улазно-излазног скупа за тренирање). *Backpropagation* алгоритмом подешавају се параметри функција припадности премиса док се методом најмањих квадрата подешавају коефицијенти линеарне комбинације закључка. *Abraham (2005)* аутор истиче да су функције *min* и *max* замењене диференцијабилним функцијама као и да излазна функција припадности мора бити монотонно неоппадајућа. Аутор такође наводи да се, уколико се користе Гаусове функције припадности, *ANFIS* може поредити са мрежама са радијално заснованом функцијом (енгл. *radial basis function*) [97]. *Jang* и његови коаутори (1997) поредили су *ANFIS* са другим техникама и показали су да поседује ефикасније алгоритме учења, тренирање је брже а софтвер једноставнији. Иако је један од првих интегрисаних модела, показао се као најбољи апроксиматор и најбрже је конвергирао у поређењу са другим неуро-фази моделима [101].

Глава 3.

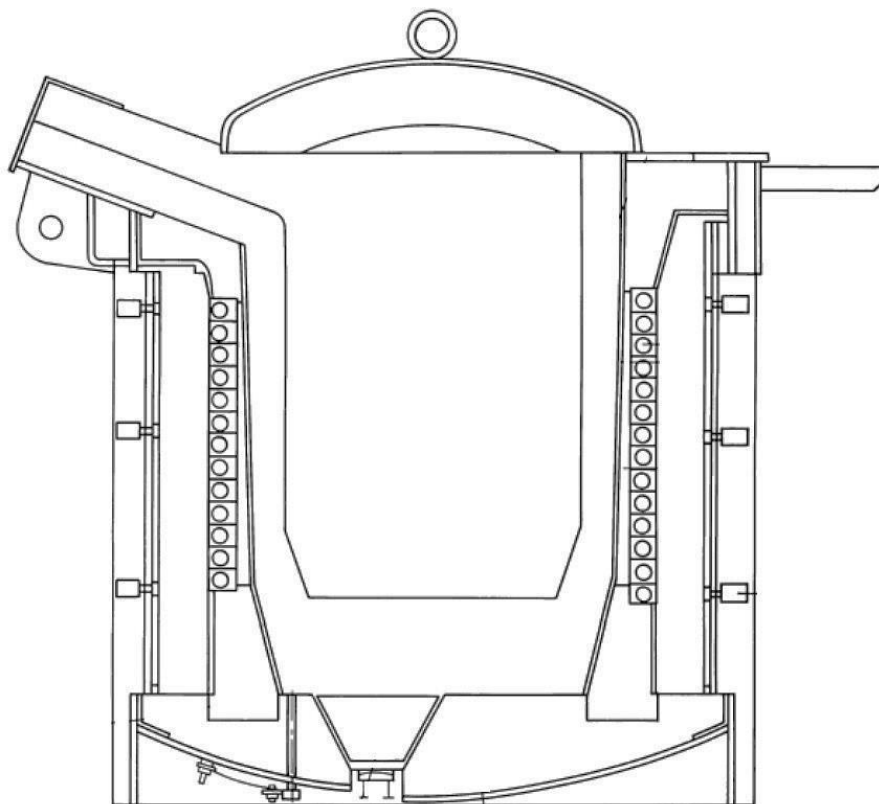
МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ТОПЉЕЊА МЕТАЛА

У производним процесима у ливницама као императив се поставља управљање процесом топљења метала са циљем да се добије жељени хемијски састав и температура истопљеног метала. Објекте управљања представљају количина легирајућих елемената и одговарајући енергенти. Природа процеса топљења метала је веома комплексна, па употреба конвенционалних математичких и термодинамичких модела није најсрећнији и најефикаснији приступ. Наиме, комплексност процеса рефлектује се кроз сложену природу интеракције између процесних варијабли, као што су топлотни губитак и динамика нелинеарних хемијских реакција. Ово поглавље доктората представља примену техника вештачке интелигенције, вештачких неуронских мрежа (ВНМ) и генетских алгоритама (ГА), у моделирању процеса топљења метала. Моделиран је процес добијања белог ливеног гвожђа у ливници Индустијског комбината у Гучи, са основним циљем развоја поузданог модела са високим перформансама предикције количине легирајућих елемената да се оствари жељени хемијски састав белог ливеног гвожђа.

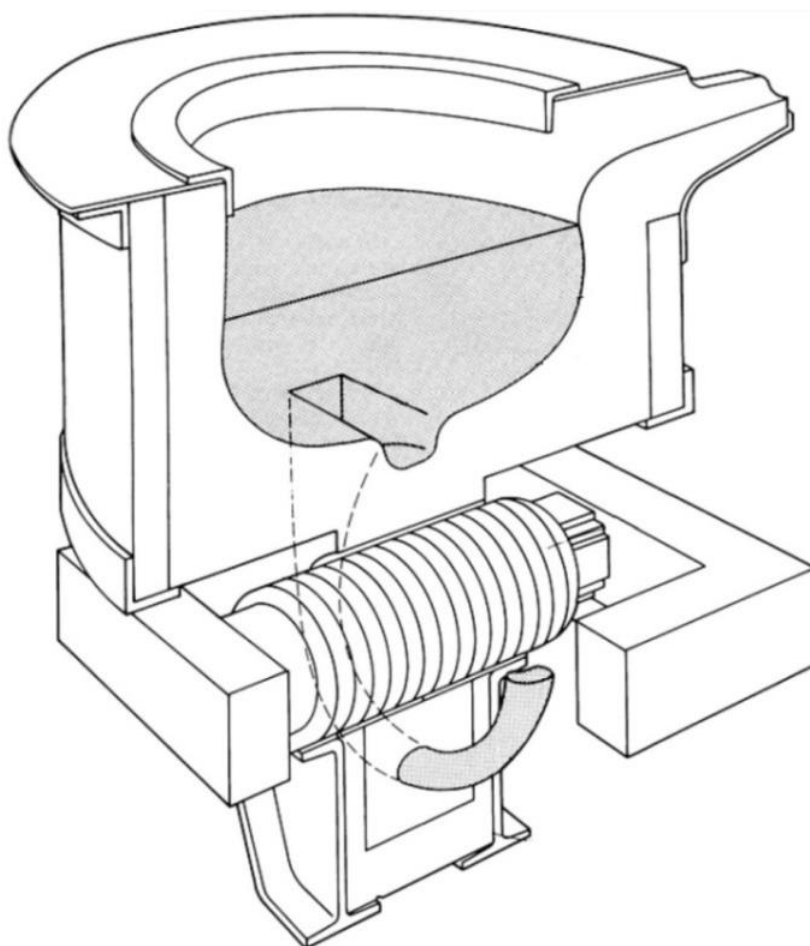
3.1. ОПИС ПРОЦЕСА И ЊЕГОВИ ФИЗИЧКИ ФЕНОМЕНИ

Производња белог ливеног гвожђа у Индустијском комбинату у Гучи реализује се у мрежно – фреквентним лончастим индукционим пећима капацитета осам тона, које раде

на фреквенцији од 50Hz. Индукционе пећи раде на принципу употребе јаког магнетног поља насталог проласком електричне струје кроз калем намотан око материјала који се топи. Последица деловања индуковане струје у металу је загревање и топљење истог. Електромагнетна сила истовремено узрокује и мешање топљеног метала. Рундев и његови коаутори у својој књизи на систематичан и разумљив начин дају појашњење феномена електромагнетне силе и преноса топлоте [102]. Елементарна класификација индукционих пећи је на лончасте и каналне индукционе пећи. Суштинска разлика између наведених пећи је у томе што се код лончастих индукционих пећи целокупна шаржа налази у “омотачу” који формира бакарни калем (примар), и представља секундар, а код каналних индукционих пећи бакарни калем (примар) је мали и, самим тим, загрева и топи малу количину метала. Та мала количина метала се налази у каналу (секундар), око кога је конструисан калем, из кога се прослеђује у главну посуду где се меша са хладним металом који загрева конвекцијом. На слици 3.1. и 3.2. дати су попречни пресеци два типа индукционих пећи.



Слика 3.1. Приказ попречног пресека лончасте индукционе пећи [103]



Слика 3.2. Приказ попречног пресека каналне индукционе пећи [103]

За процес топљења метала адекватније су лончасте индукционе пећи, које се користе као високопродуктивне топионичке јединице или пак као индукциони лончasti рецептори за акумулацију, одржавање температуре и прегревање лива. Користе директан и индиректан грејни систем. Ако је шаржа електропроводна, онда се ради о директном грејању индукцијом, док је за грејање електронепроводне шарже могуће користити индиректан систем грејања у коме се индукционим путем загрева електропроводан лонац (графитни, метални), а из њега шаржа прима топлоту системом кондуктивног преноса. Давидовић и његови коаутори истичу битне квалитете индукционих лончastих пећи у погонима ливница, као што су [104]:

- директно развијање топлоте у шаржи,
- висок производни учинак,
- добар степен искоришћења, квалитет и чистоћа лива,
- хомогеност састава и температуре,
- економично претапање спона,
- широка могућност регулације снаге,

- мала топлотна инерција пећи,
- лако стартовање,
- добре могућности измене врсте и састава шарже,
- незнатно сагоревање материјала,
- прецизност припремања легуре,
- одсуство локалних прегревања а самим тим и минимално присуство гасова у ливу,
- релативно лака синхронизација погона топioniце и калупарнице,
- широке могућности аутоматизације,
- завидна хигијена и хуманизација рада у ливници,
- знатан допринос индукционих топioniчких постројења у чувању животне и радне средине човека,
- могућност вођења процеса топљења у вакуму или заштитној атмосфери.

Уз представљене бројне предности, иста група аутора наводи и слабе тачке лончастих индукционих пећи:

- ниска температура шљаке,
- високи инвестициони трошкови постројења,
- проблематика компензације фактора снаге,
- проблематика симетрисања,
- потребе већих учестаности,
- већа чистоћа сировина.

Поред прегледа квалитативних карактеристика ове врсте индукционих пећи, поменута група аутора даје препоруке за области коришћења ових уређаја при којима се постижу оптимални резултати. У наставку овог поглавља доктората, кроз два подпоглавља која следе, изложена је примена ВМ и ГА у управљању и оптимизацији процеса добијања белог ливеног гвожђа у лончастој мрежно - фреквентној индукционој пећи.

3.2. ПРИМЕНА НЕУРОНСКИХ МРЕЖА У ПРОИЗВОДЊИ БЕЛОГ ЛИВЕНОГ ГВОЖЂА

Циљ овог подпоглавља је развој ефикасног модела предикције хемијског састава белог ливеног гвожђа, како би се управљало процесом легирања и оно учинило прецизним и економичним. Први корак начињен у том смеру је избор одговарајуће технике моделирања процеса, што је у конкретном случају избор ВМ као техника рачунарске интелигенције способних да идентификују унутрашње односе кроз процес учења. Наиме,

употребљене су неуронске мреже које у процесу обучавања користе алгоритам са пропагацијом грешке уназад, а које су детаљно објашњене у другој глави доктората. Други корак је прикупљање и организација података адекватних за обуку неуронских мрежа. И на крају, трећи корак, је моделирање процеса употребом ВНМ.

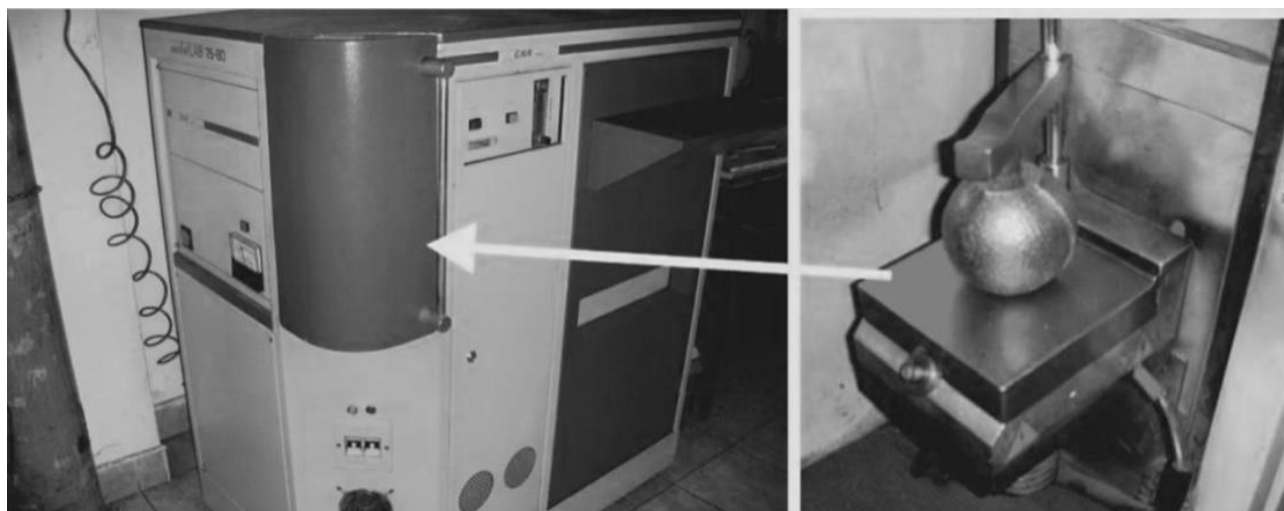
3.2.1. Поставка експеримента

Прикупљање података реализовано је, као што је већ горе наведено у реалним индустријским условима ливнице Индустријског комбината из Гуче. Дакле, у лончастој мрежно – фреквентној индукционој пећи капацитета осам тона, на температури од 1500 °С, топи се бело ливено гвожђе. Једна шаржа представља један сет података, а прикупљено је укупно 120 сетова података, дакле број испраћених топљења је 120 шаржи.



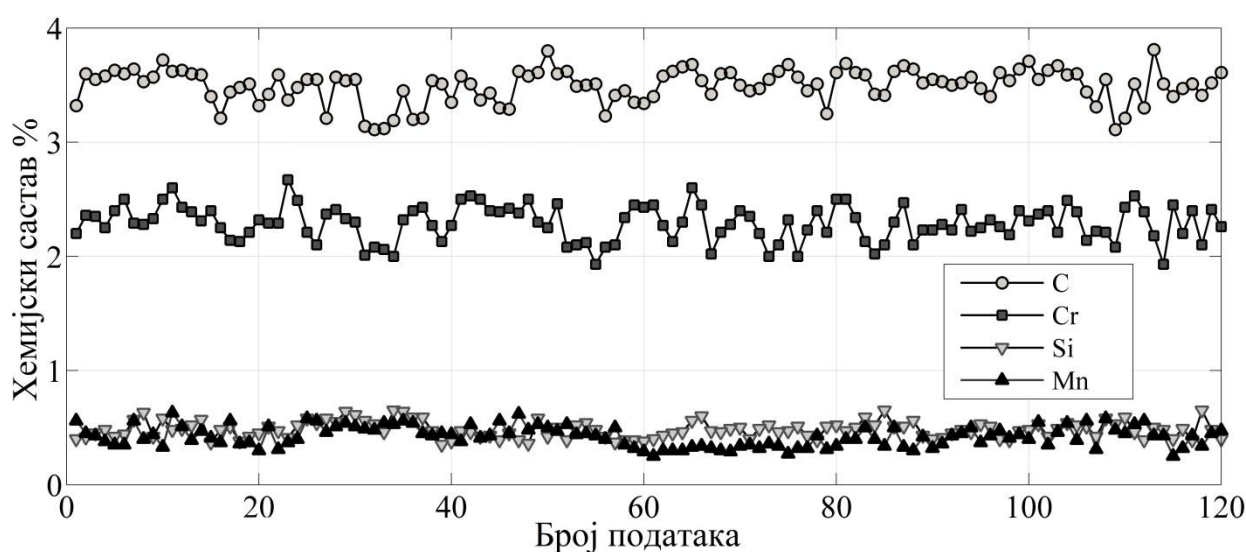
Слика 3.3. Сипање истопљеног гвожђа из пећи у лонац за транспорт

Пећ се не празни никада до краја током процеса топљења, већ у њој остаје око 30% укупног капацитета, тј. две и по тоне истопљеног метала. Хемијски састав истопљеног метала који остаје у пећи је познат од пређашње хемијске анализе истопљеног метала. Хемијска анализа изводи се на квантометру *METALLAB 75/80 (GNR-Italy)* (Слика 3.4).



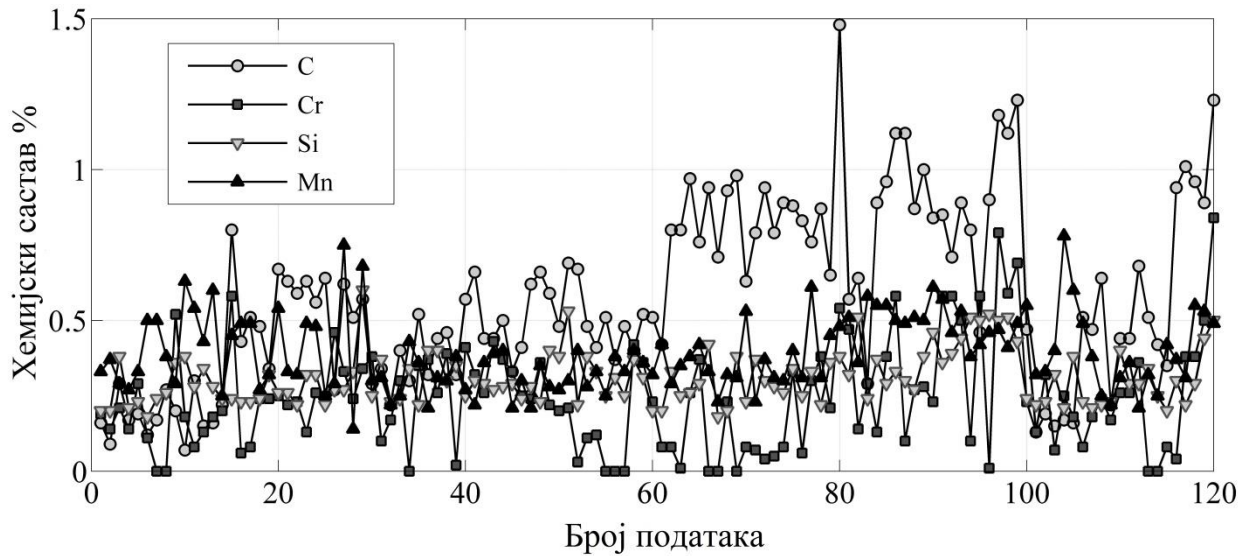
Слика 3.4. Приказ спектрохемијског уређаја и место постављања узорка за анализу

У двотрећински празну индукциону пећ (ако се претпостави да једну трећину заузима количина од две и по тоне истопљеног метала које се не празне) додаје се пет тона челичног отпада познатог хемијског састава. Након топљења врши се нова хемијска анализа и следи легирање уколико је потребно, а затим нова анализа и легирање до постизања жељеног хемијског састава. У конкретном случају праћена су четири хемијска елемента: угљеник (C), хром (Cr), силицијум (Si) и манган (Mn), значајна за квалитативне карактеристике одливка за који је намењено произведено бело ливено гвожђе. Након топљења 120 шаржи формирано је исто толико сетова података, организованих у четири групе. Прву групу чини хемијски састав две и по тоне истопљеног метала које остају у пећи након топљења. На слици 3.5 дат је приказ хемијског састава две и по тоне истопљеног белог ливеног гвожђа кроз 120 шаржи.



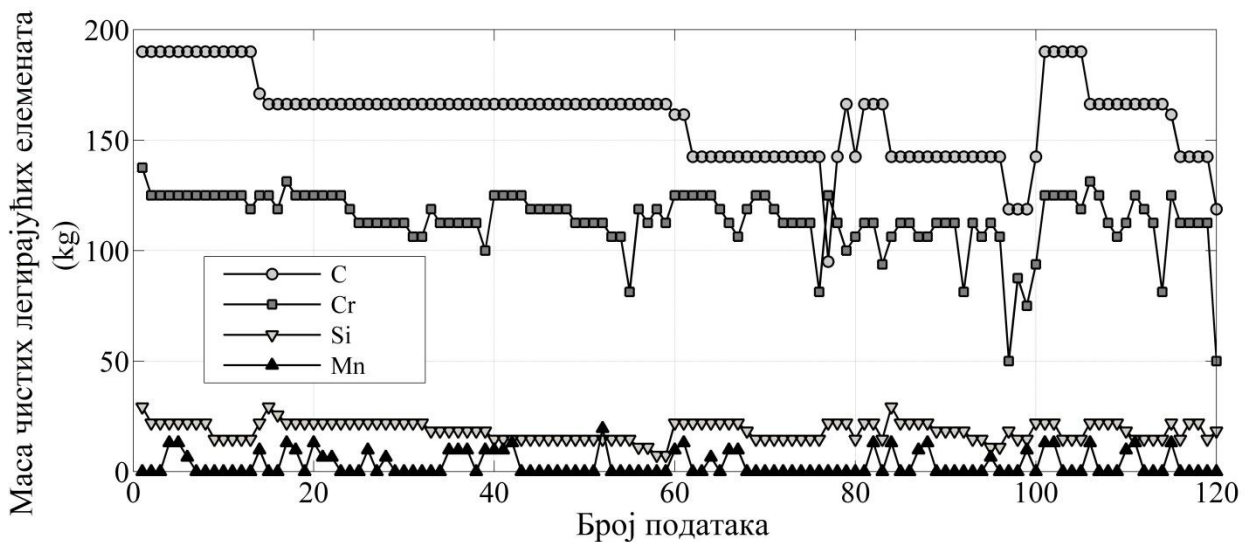
Слика 3.5. Хемиски састав (C, Cr, Si, Mn) две и по тоне гвожђа у пећи

Другу групу података чини хемијски састав пет тона челичног отпада који се додаје у пећ. На слици 3.6 дат је приказ хемијског састава пет тона челичног отпада.



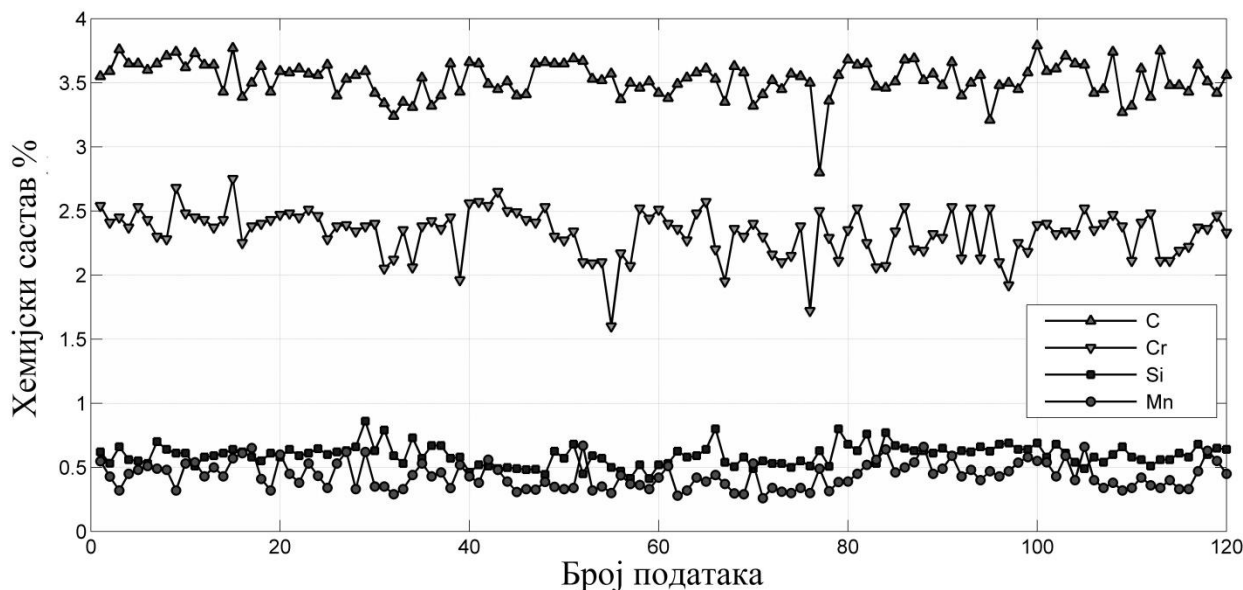
Слика 3.6. Хемијски састав (C, Cr, Si, Mn) челичног отпада

Трећу групу података представља количина чистог метала који се додаје у процесу легирања. Количина праћених хемијских елемената, додата у процесу легирања током 120 праћених топљења, приказана је на слици 3.7.



Слика 3.7. Маса чистих легирајућих елемената (C, Cr, Si, Mn) додата у процесу легирања

Коначно, четврту групу података представља хемијски састав истопљеног гвожђа након легирања (Слика 3.8).

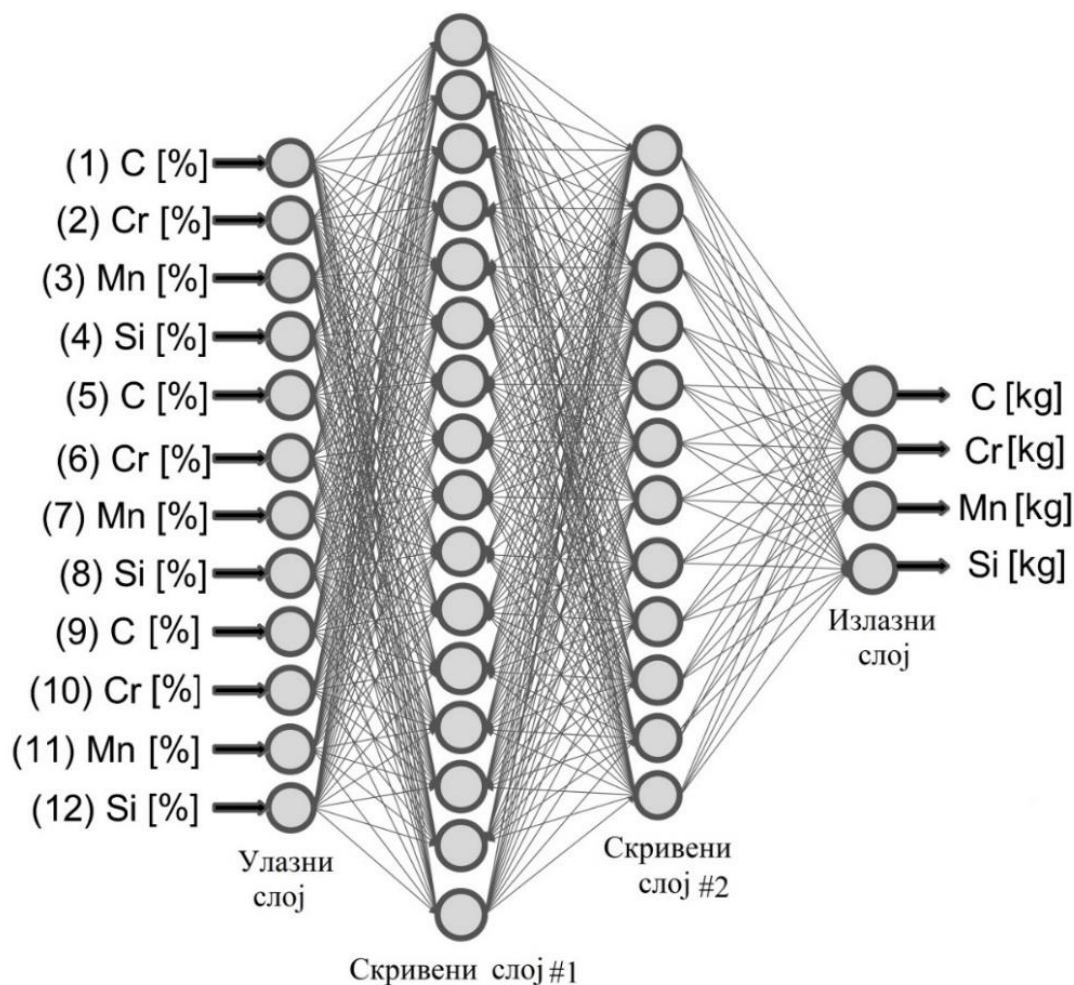


Слика 3.8. Коначан хемијски састав (C, Cr, Si, Mn) након легирања

3.2.2. Моделирање процеса добијања белог ливеног гвожђа

Наредни корак у процесу развоја модела за управљање легирањем је дефинисање улаза и излаза из неуронске мреже. Улаз у мрежу чини хемијски састав две и по тоне белог ливеног гвожђа које остају у пећи након топљења: (1) C (%), (2) Cr (%), (3) Mn (%), (4) Si (%), затим хемијски састав пет тона челичног отпада: (5) C (%), (6) Cr (%), (7) Mn (%), (8) Si (%), и на крају коначни хемијски састав белог ливеног гвожђа: (9) C (%), (10) Cr (%), (11) Mn (%), (12) Si (%). Дакле, улаз има дванаест неурона. Излаз из неуронске мреже је количина чистог метала која се користи у процесу легирања, а у циљу добијања коначног жељеног хемијског састава белог ливеног гвожђа: (1) C (kg), (2) Cr (kg), (3) Mn (kg), (4) Si (kg). Дакле, излаз има четири неурона. Смисао овакве поставке улаза и излаза јесте да процес симулације рада модела неуронске мреже са најбољим перформансама, омогући да се уношењем улазних података, на излазу добије количина чистог метала потребног за добијање жељеног коначног хемијског састава белог ливеног гвожђа, који партиципира у улазу кроз четири неурона. Неурони у улазном и скривеном слоју користе сигмоидну функцију преноса, а неурони у излазном слоју користе линеарну функцију преноса. За моделирање овог процеса креиран је велики број архитектура са једним или два скривена слоја, као и са различитим бројем неурона у тим скривеним слојевима. За креирање и тестирање модела неуронских мрежа коришћен је сет од 120 података, који је подељен у три групе, за тренинг, валидацију и тестирање у следећем односу: 70%:15%:15%. Сет од 84 податка представљен је мрежи у току фазе учења, а сетови од по 18 података у фазама валидације и тестирања. Од неколико дизајнираних модела неуронских мрежа, најбоље

перформансе показала је архитектура вештачке неуронске мреже (ВНМ) са два скривена слоја ВНМ 12–16–12–4.



Слика 3.9. Архитектура мреже (ВНМ 12–16–12–4) са најбољим перформансама

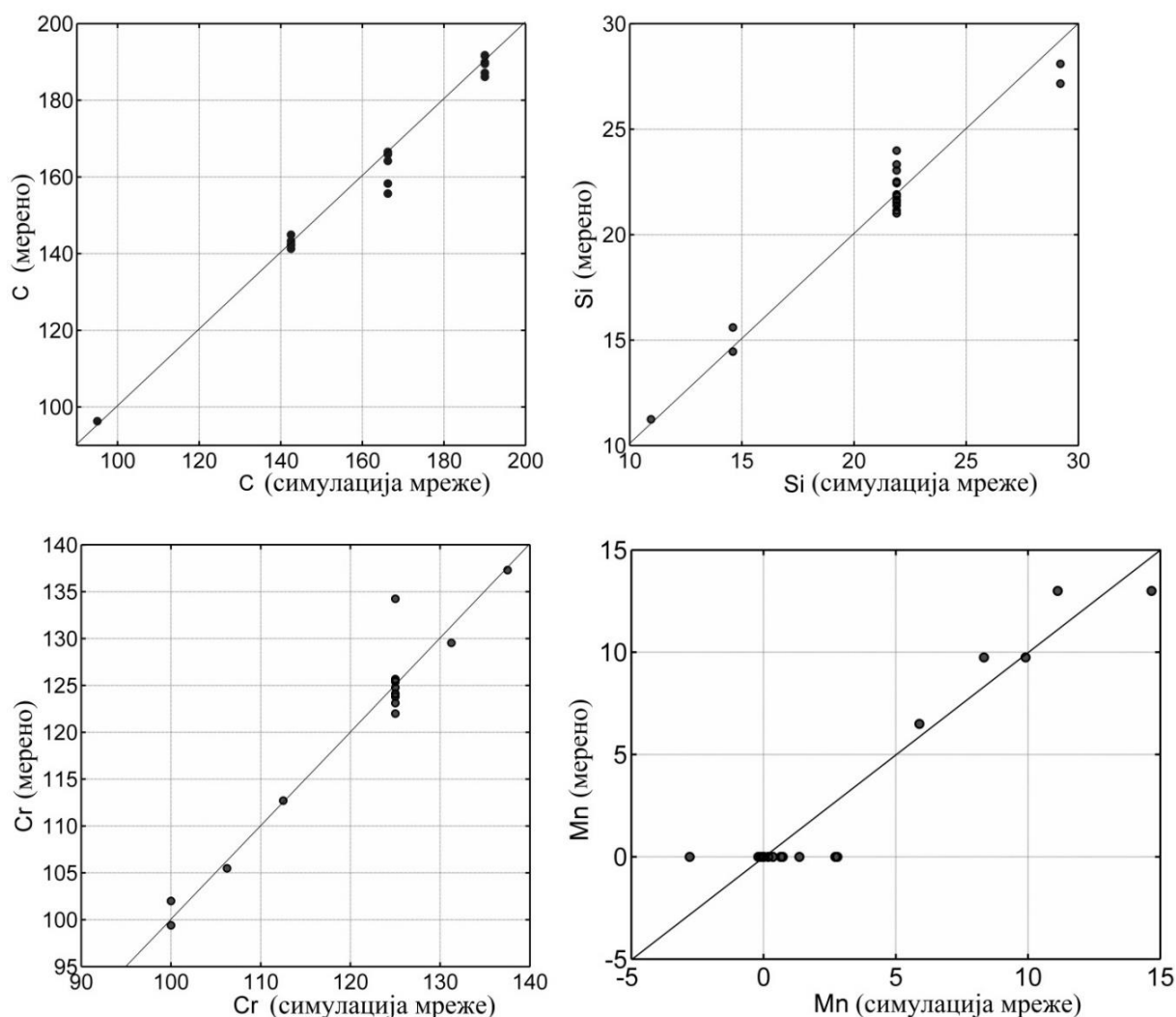
Као мера ваљаности креираних модела мрежа коришћене су максимална и средња грешка у фази тестирања. Резултати за мрежу ВНМ 12–16–12–4 дати су у табели 3.1.

Табела 3.1. Максимална и средња грешка ВНМ 12–16–12–4

	C [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]
Максимална грешка	6.36	9.52	7.40	14.51
Средња грешка	2.09	3.40	2.24	10.34

Резултати тестирања су показали да се неуро мрежа ВНМ 12–16–12–4 може успешно применити при дефинисању потребне количине чистог метала у фази легирња, да се добије жељени коначни хемијски састав белог ливеног гвожђа. Резултати за угљеник, силицијум и хром су веома добри, док је резултат за манган нешто лошији, а узрок томе је то што манган није учествовао у фазама легирања у великом броју шаржи, што је уочљиво

на слици 3.7. Поређење резултата добијених мерењем и резултата које је дала симулација мреже у фази тестирања дато је на слици 3.10.



Слика 3.10. Упоредна анализа резултата добијених мерењем и предикцијом употребом ВМ 12–16–12–4

3.3. РАЗВОЈ ИНТЕЛИГЕНТНОГ НЕУРО–ГЕНЕТСКОГ СОФТ СЕНЗОРА ЗА ИНТЕГРАЦИЈУ ДВА ПРОИЗВОДНА ПРОЦЕСА

Предмет овог дела докторске дисертације је примена рачунарске интелигенције у моделирању и оптимизацији параметара два повезана производна процеса, млевења руде бабра и производње флотацијских кугли за млевење руде. У технолошком процесу млевења руде бабра значајну улогу има квалитет кугли које се користе у млиновима за млевење руде. Због природе процеса у коме се користе и захтева за високом отпорношћу на хабање, кугле се израђују од белог ливеног гвожђа. Од карактеристика хабања кугли зависи квалитет млевења руде и економичност процеса производње бабра. Да би се технолошким процесом млевења руде бабра управљало на оптималан начин потребно је

успоставити зависност између технологије израде флотацијских кугли и технолошког процеса млевења руде. Ниво хабања флотацијских кугли са једне стране зависи од механичко - хемијских карактеристика материјала кугли добијених процесом ливења, а са друге стране од састава руде. Технологијом израде флотацијских кугли, преко тврдоће (*HRC*) и хемијског састава, може се утицати на ниво хабања кугли. Циљ овог подпоглавља је да успостави везу између хабања флотацијских кугли и припреме лива (хемијског састава лива) од кога се израђују кугле. Постизање циља обухвата три етапе у којима се користе технике вештачке интелигенције. У првој етапи употребом вештачке неуронске мреже (ВНМ), на бази експерименталних резултата, успостављена је нелинеарна зависност између хабања флотацијских кугли са једне стране и хемијског састава и тврдоће флотацијских кугли са друге стране. Друга етапа обухвата проналажење хемијског састава и тврдоће за које је хабање минимално. У ту сврху употребљен је генетски алгоритам (ГА) чија је функција циља креирана неуронска мрежа из прве етапе. На крају, у трећој етапи, употребом нове неуронске мреже извршено је управљање припремом лива, тачније процесом легирања, за флотацијске кугле са циљем постизања жељеног хемијског састава који је дао генетски алгоритам. Генерално, приступ овом истраживању заснован је на комбинованој употреби ВНМ и ГА.

3.3.1. Моделирање процеса флотације руде

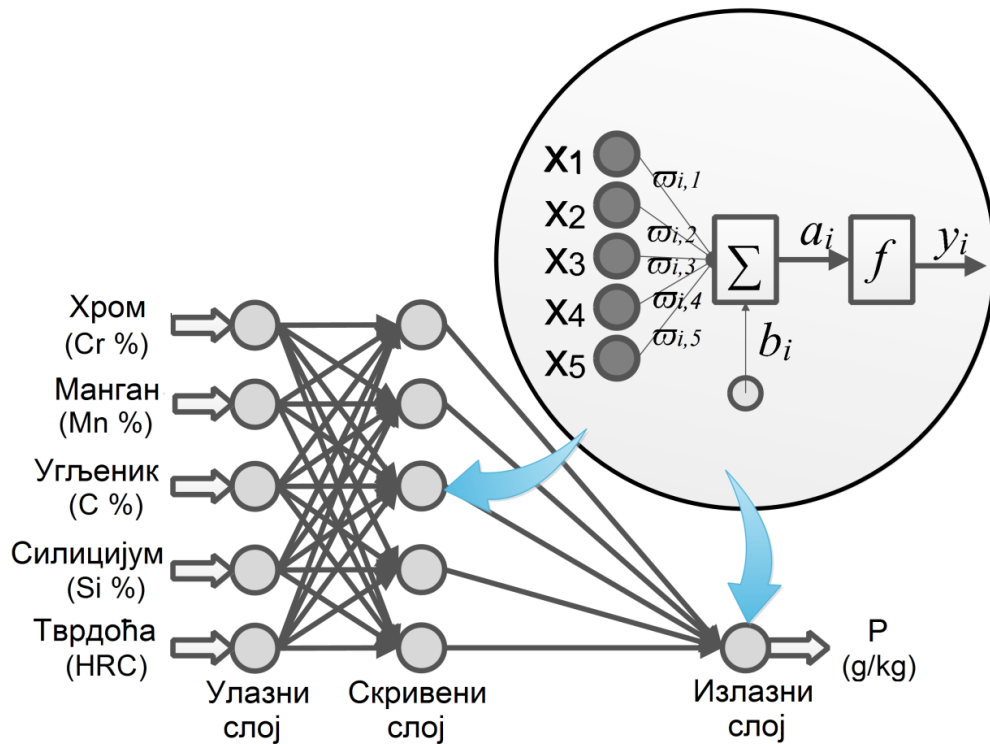
Како је циљ прве етапе успостављање зависности између хабања флотацијских кугли са једне стране и хемијског састава и тврдоће флотацијских кугли са друге стране, креиран је модел ВНМ, способан да успостави унутрашње везе између наведених варијабли. За развој модела ВНМ коришћени су експериментални подаци са вредностима нивоа хабања кугли у процесу млевења руде и њиховим хемијским саставом и тврдоћом, као хемијско - механичким особинама. Подаци су преузети из предузећа "ИКГ" Гуча, а њихово прикупљање спроведено је према у наставку описаном принципу. Наиме, сваки експеримент за мерење нивоа хабања флотацијских кугли реализован је у експерименталном млину запремине $V = 0.0152m^3$. У млин се иницијално ставља 2.5 килограма руде бакра и десет флотацијских кугли масе 0.85 килограма и пречника $\Phi 60$, из исте серије. Дакле, истог хемиског састава и тврдоће. Испитивање тврдоће изведено је методом *Rockwel "C"* (уређај: *5006-VXL 4.2, ТОЧПРИБОР РОСИИ*) на припремљеним узорцима кугли (фино пребршених на укупну висину $h=50mm$). Испитивање хемијског састава узоркованих кугли с површинама припремљеним на исти начин као за мерење тврдоће извршено је методом оптичке спектрохемијске анализе на мерном уређају

METAL-LAB 75/80 (*GNR-ITALIJA*). На сваких 12 минута у млин се додаје нова маса руде од 2.5 килограма. Експериментално млевање траје континуирано док се не достигне маса руде од 500 килограма. Након тога се утврђује ниво хабања кугли тако што се од укупне масе кугли изражене у грамима, са почетка експеримента, одузме укупна маса кугли након мелевења руде. Та вредност подељена са укупно самлевењем количином руде (у конкретном случају 500 килограма) представља меру нивоа хабања кугли у процесу мелевења руде, изражену у грамима по килограму самлеване руде. Укупан број реализованих експеримената је 73, а неке експерименталне вредности дате су у табели 3.2.

Табела 3.2. Експериментални резултати мелевења руде

Р.бр.	HRC	Mn (%)	Cr (%)	C (%)	Si (%)	P (g/kg)
1	57.17	0.4	2.74	3.57	0.65	0.542
2	56.59	0.41	2.6	3.33	0.63	0.635
3	57.95	0.43	2.68	3.35	0.56	0.536
4	57.29	0.48	2.4	3.52	0.71	0.546
5	58.72	0.44	2.8	3.41	0.48	0.524
6	57.39	0.44	2.49	3.58	0.52	0.544
7	59.06	0.43	2.52	3.48	0.56	0.528
8	57.71	0.42	2.6	3.59	0.4	0.568
9	57.32	0.4	2.48	3.51	0.56	0.572
10	58.17	0.44	2.8	3.95	0.66	0.549
...

За успостављање везе између нивоа хабања кугли (P) са једне стране и механичко хемијских особина са друге, употребљене су ВМ које у процесу обучавања користе алгоритам са пропагацијом грешке уназад, а које су детаљно објашњене у другој глави доктората. Улази у ВМ су механичко - хемијске особине: HRC , Mn (%), Cr (%), C (%), Si (%), а излаз је ниво хабања $P(g/kg)$. Неурони у улазном и скривеном слоју користе сигмоидну функцију преноса, а неурони у излазном слоју користе линеарну функцију преноса. За моделирање овог процеса креирано је неколико архитектура ВМ са једним или два скривена слоја, као и са различитим бројем неурона у тим скривеним слојевима. За креирање и тестирање модела ВМ коришћен је сет од 73 података, који је подељен у три групе, за тренинг, валидацију и тестирање. Сет од 51 податка представљен је мрежи у току фазе учења, а сетови од по 11 података фазама валидације и тестирања. Као мера ваљаности креираних модела мрежа коришћене су максимална и средња грешка у фази тестирања. Од неколико дизајнираних модела неуронских мрежа, најбоље перформансе показала је архитектура ВМ 5–5–1.



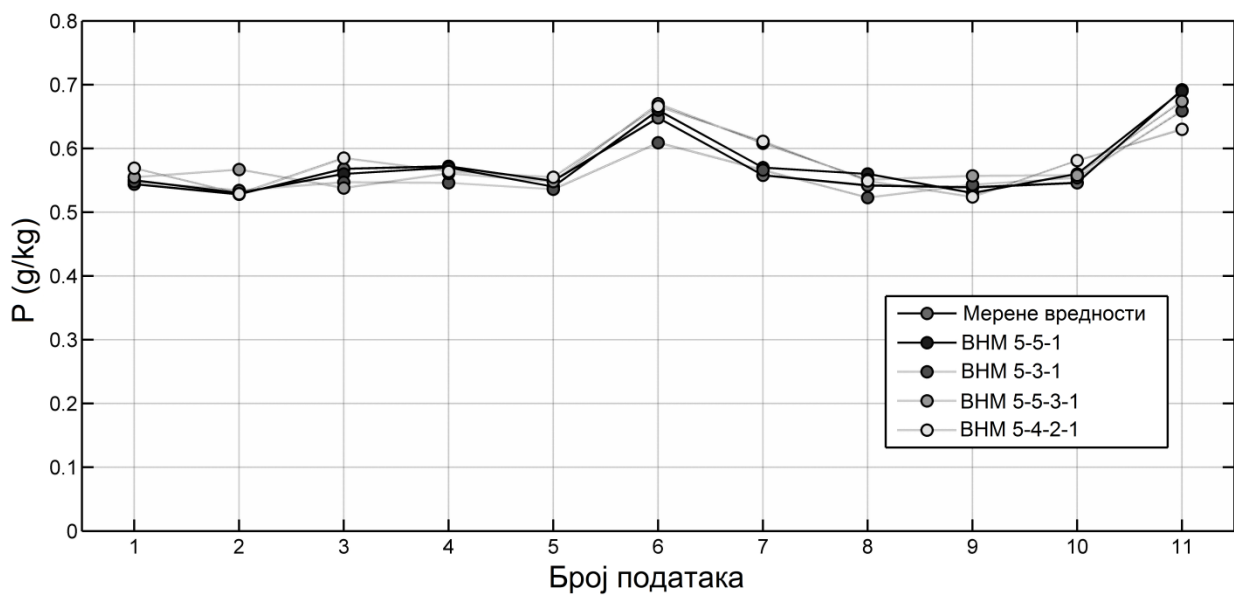
Слика 3.11. Приказ вештачког неурона и модела ВММ 5 – 5 – 1

У табели 3.3 дато је поређење резултата неколико различитих архитектура ВММ.

Табела 3.3. Максимална и средња грешка различитих архитектура ВММ

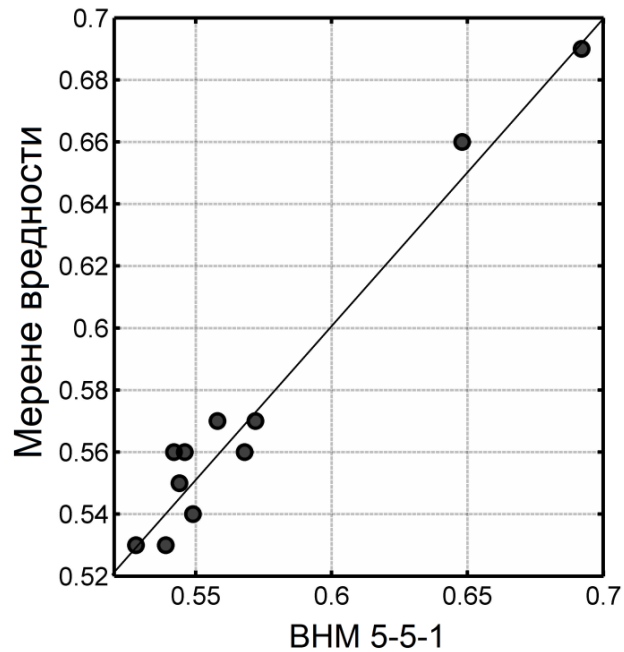
	ВММ 5-5-1	ВММ 5-3-1	ВММ 5-5-3-1	ВММ 5-4-2-1
Максимална грешка (%)	2.49	5.96	8.94	9.52
Средња грешка (%)	1.78	2.75	3.55	3.81

На слици 3.12. дат је графички приказ поређења у табели наведених архитектура ВММ .



Слика 3.12. Предикција нивоа хабања различитим архитектурама ВММ

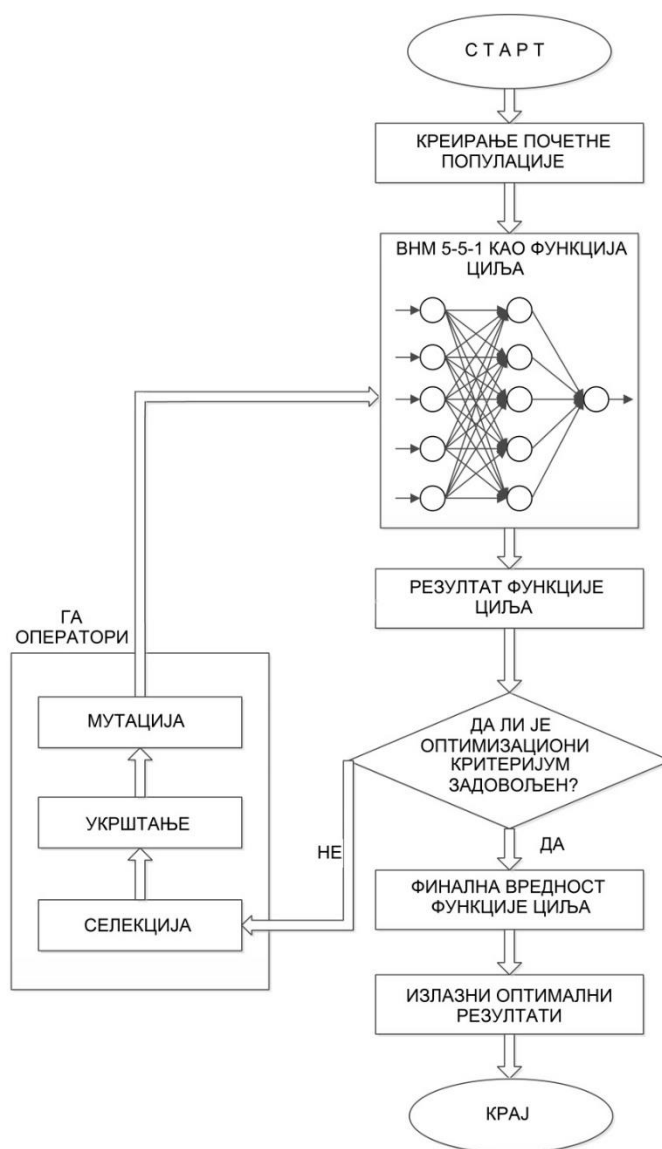
На основу података приказаних на слици 3.12 и наведених у табели 3.3, ВНМ 5-5-1 мрежа је усвојена као она која показује најбоље перформансе у поређењу са другим моделима ВНМ. Представљени модел мреже је показао добре карактеристике поклапања са експерименталним подацима у фази тесирања, тако да се може користити као ефикасан алат за предикцију нивоа хабања флотацијских кугли у функцији њиховог хемијског састава и тврдоће (Слика 3.13).



Слика 3.13. Поређење мерених и ВНМ вредности нивоа хабања кугли

3.3.2. Оптимизација процеса флотације руде

Након успостављања корелације између нивоа хабања флотацијских кугли и њихових механичко - хемијских карактеристика, следи трагање за поменутим карактеристикама за које је ниво хабања кугли најмањи. У ту сврху се користи ГА као инжењерски веома применљива оптимизациона техника, а ВНМ из прве етапе представља његову функцију циља. Алгоритам принципа комбиновања ГА и ВНМ приказан је на слици 3.14.



Слика 3.14. Алгоритам оптимизационог процеса

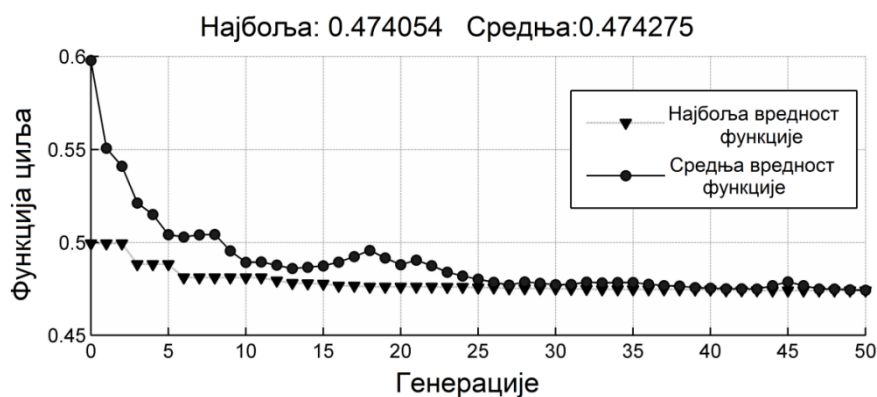
Почетна популација генерише се произвољно, а њена ваљаност се испитује кроз функцију циља, коју као што је наглашено представља ВНМ 5–5–1. Затим следе процедуре ГА оператора (селекција, укрштање и мутација), кроз које се генерише нова популација. Процес се понавља док се не задовољи један од услова за заустављање рада ГА. У конкретном случају почетна популација има 30 јединки, а задати максималан број

генерација је 50. Домен претраге величина које се оптимизују дефинисан је максималним и минималним вредностима величина које су коришћене у креирању ВНМ (Табела 3.4).

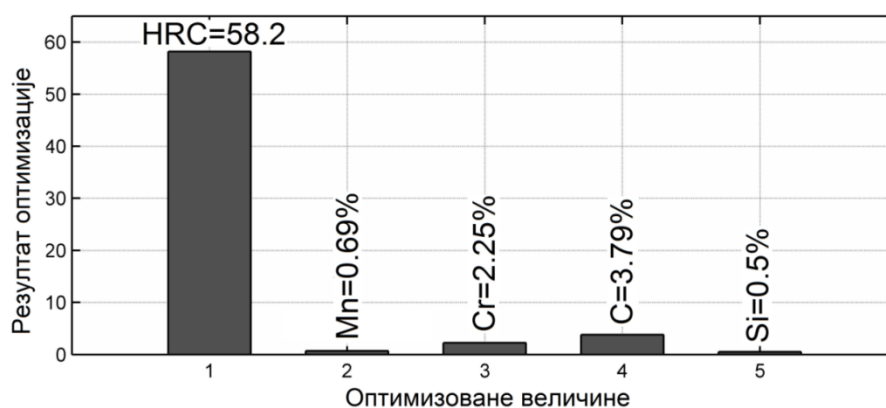
Табела 3.4. Домен претраге величина које се оптимизују

	Cr (%)	Mn (%)	C (%)	Si (%)
Доња граница	2	0.38	3.11	0.3
Горња граница	2.8	0.79	3.95	0.88

У фази селекције коришћена је техника стохастичке универзалне селекције, а у фази укрштања коришћена је техника униформног укрштања. Максималан број елитних јединки који се преноси у нове генерације је две јединке. Када је достигао број од 50 генерација ГА је зауставио свој рад, а добијени резултати су следећи: функција циља износи 0.474 (g/kg), а оптимизоване величине имају следеће вредности: (1) HRC= 58.2; (2) Mn=0.69%; (3) Cr=2.247%; (4) C=3.79%; (5) Si=0.5%.



Слика 3.15. Минимизација хабања флотацијских кугли кроз генерације



Слика 3.16. Вредности оптимизованих величина

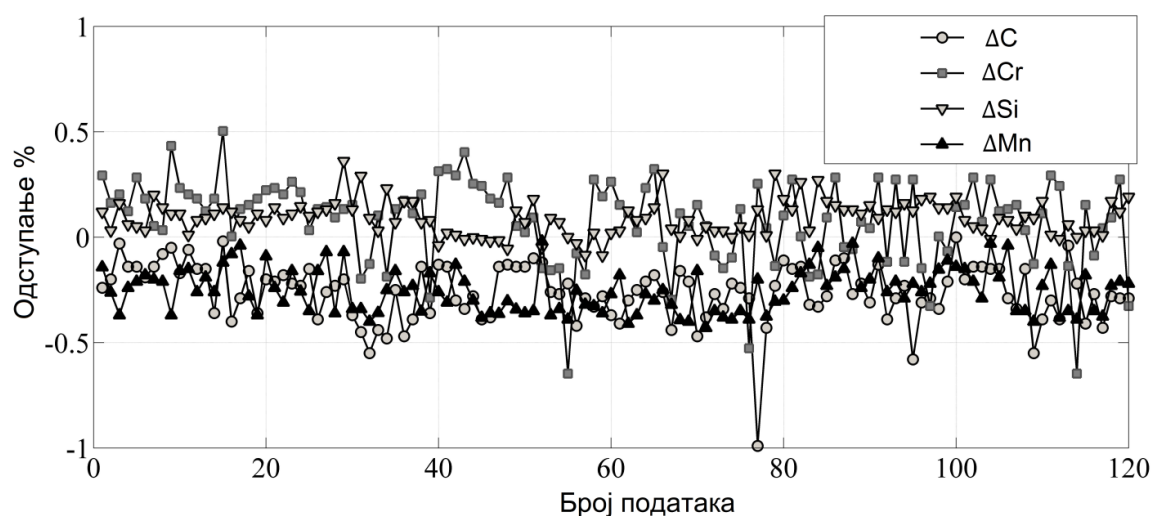
3.3.3. Развој интелигентног софт сензора

Добијени хемијски састав представља референтни хемијски састав за следећу, трећу етапу интеграције два производна процеса. Наиме, вредности које су производ оптимизационог процеса представљају жељене вредности хемијског састава флотацијских

кугли у њиховој производњи. До жељених вредности се долази легирањем током процеса топљења метала. Јасан циљ треће етапе је моделирање процеса топљења белог ливеног гвожђа за ливење флотацијских кугли, које ће да омогући управљање процесом легирања, а све у циљу постизања хемијског састава из друге етапе. За процес моделирања коришћене су ВНМ, и подаци из ливнице који су представљени кроз подпоглавље 3.2. овог дела доктората. Дакле, 120 сетова података следећих групација: хемијски састав две и по тоне истопљеног метала које остају у пећи након топљења, хемијски састав пет тона челичног отпада који се додаје у пећ, количина чистог метала који се додаје у процесу легирања и на крају четврту групу података представља хемијски састав истопљеног гвожђа након легирања. Улаз у мрежу чини хемијски састав две и по тоне белог ливеног гвожђа које остају у пећи након топљења: (1) C (%), (2) Cr (%), (3) Mn (%), (4) Si (%), затим хемијски састав пет тона челичног отпада: (5) C (%), (6) Cr (%), (7) Mn (%), (8) Si (%), и на крају количина чистог метала која се користи у процесу легирања: (9) C (kg), (10) Cr (kg), (11) Mn (kg), (12) Si (kg). Дакле, улаз има дванаест неурона. Излазни слој из мреже чине четири неурона која представљају одступање од жељеног хемијског састава. Овај скуп података добијен је према релацији 3.1. одузимањем референтних вредности, добијених ГА оптимизацијом, од вредности коначног хемијског састава белог ливеног гвожђа.

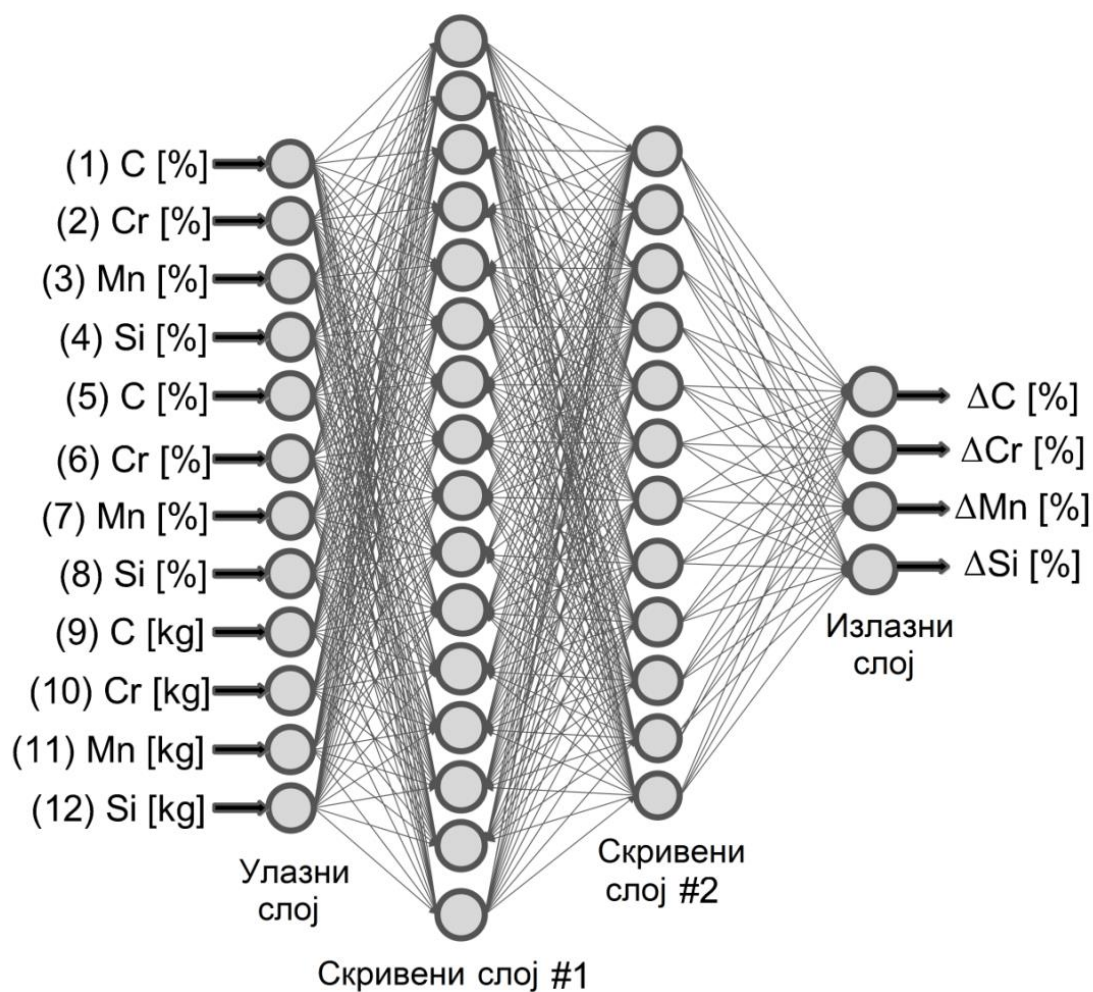
$$\left. \begin{aligned} \Delta C &= C_{(мерено)} - C_{(референтно)} \\ \Delta Cr &= Cr_{(мерено)} - Cr_{(референтно)} \\ \Delta Si &= Si_{(мерено)} - Si_{(референтно)} \\ \Delta Mn &= Mn_{(мерено)} - Mn_{(референтно)} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

На слици 3.17 приказани су подаци који су коришћени у фазама обуке, валидације и тестирања групе података која представља излаз из ВНМ.



Слика 3.17. Одступање од референтног хемијског састава

Као и у случају моделирања млевења руде бакра и предикције нивоа хабања кугли, креирано је неколико различитих архитектура ВНМ, са различитим бројем скривених слојева и нурона у њима, а архитектура са најбољим резултатима је усвојена. Архитектура ВНМ 12–16–12–4 показала је најбоље резултате у фази тестирања у којој је партиципирао сет од 18 података који није коришћен у фазама обуке и валидације. Мера њене ваљаности су максимална и средња грешка у фази тестирања, за праћене хемијске елементе. У табели 3.5 дате су вредности одговарајућих грешака, а на слици 3.18. приказ поменуте архитектуре ВНМ.

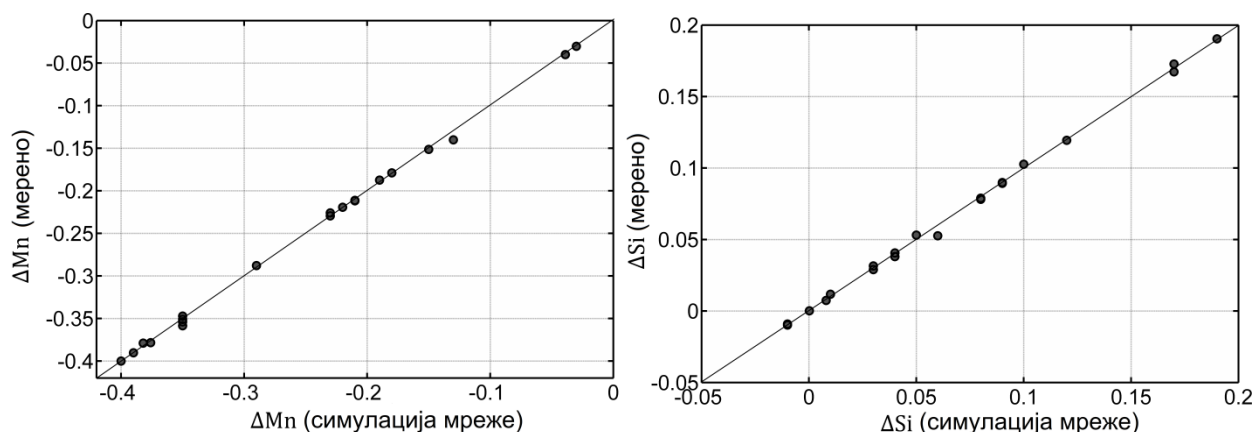


Слика 3.18. Архитектура ВНМ 12–16–12–4

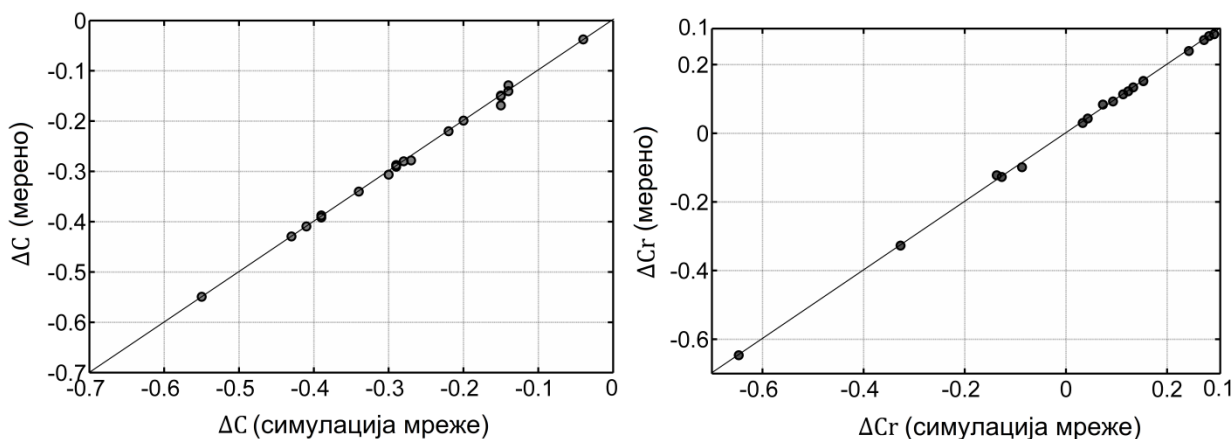
Табела 3.5. Максимална и средња грешка ВНМ 12–16–12–4

	ΔC (%)	ΔSi (%)	ΔCr (%)	ΔMn (%)
Максимална грешка	12.54	17.86	14.4	7.78
Средња грешка	1.85	4.70	2.83	1.21

На сликама 3.19. и 3.20. дата је упоредна анализа мерених резултата и резултата добијених симулацијом мреже ВНМ 12–16–12–4.



Слика 3.19. Поређење резултата добијених мерењем и предикцијом за манган и силицијум



Слика 3.20. Поређење резултата добијених мерењем и предикцијом за угљеник и хром

Резултати тестирања показују да је модел ВНМ 12–16–12–4 ваљан за предикцију одступања од референтног (жељеног) хемијског састава белог ливеног гвожђа. Квалитет предложеног модела најизраженији је у предикцији одступања од жељене вредности мангана, али и у предикцијама за преостала три елемента показује веома задовољавајуће резултате. Посебну вредност моделу даје чињеница да су вредности одступања изражене у десетим деловима процента. Симулацијама употребом предложеног модела омогућава се управљање процесом легирања, са циљем да излази из модела ВНМ теже нули ($\Delta C \rightarrow 0$, $\Delta Cr \rightarrow 0$, $\Delta Mn \rightarrow 0$, $\Delta Si \rightarrow 0$), како би се добио жељени хемијски састав. Тако је, дакле, могуће симулацијама подешавати потребну количину чистог метала у фазама легирања, да одступање од коначног жељеног хемијског састава буде минорно. Ова карактеристика развијеног модела ВНМ 12–16–12–4 га сврстава у својеврстан интелигентни софтверски сензор за управљање процесом топљења белог ливеног гвожђа.

Глава 4.

ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА ЛИВЕЊА У ПЕСКУ

Правилно и потпуно попуњавање калупа је основни циљ процеса ливења, којим се постиже висок квалитет одливка. Улога дизајна уливног система и дизајна хранитеља у остварењу овог циља веома је значајна. Неправилан дизајн уливног система доводи до бројних недостатака у процесу ливења, што за последицу има низак квалитет одливка. То су углавном следећи недостаци: непотпуо пуњење калупа, чврсти и гасовити укључци. Непотпуо пуњење калупа манифестује се у два облика: хладни варови и шупљине. Хладни варови се јављају у случају сусрета два флуида супротних смерова који се не могу стопити у потпуности. Шупљине се јављају када растопљени метал не попуни одређене делове калупа. Чврсти укључци су директна последица турбуленција и манифестују се као укључци песка. Гасовити укључци се јављају као ваздух "заробљен" у калупу, у форми рупа и порозности. Дакле, задатак уливног система је да обезбеди глатко, уједначено и потпуно пуњење калупа чистим, истопљеним металом. Глатко пуњење елиминише турбуленције, уједначено пуњење обезбеђује континуирано пуњење у току времена, а потпуно пуњење подразумева вођење истопљеног метала до танких и крајњих делова калупа. Током хлађења одливка долази до запреминског скупљања метала, тј. смањења запремине одливка. Значај хранитеља се огледа у њиховој функцији да надокнађују одливку мањак течног метала услед запреминског скупљања.

Уливни систем и систем храњења представљају два интегрална дела система ливења у песку, чије унапређење је предмет овог поглавља доктората. Објекат ливења је носач резног зуба багера, а постизање високог квалитета одливка оптимизацијом и дизајном система ливења је примарни циљ овог поглавља доктората. Као оптимизационе технике коришћени су природом инспирисани метахеуристички алгоритми, објашњени у другом поглављу доктората: генетски алгоритми (*Genetic algorithm*) и оптимизација ројем честица (*Particle Swarm Optimization – PSO*). Досадашњи системи ливења коришћени у изради носача резног зуба багера, показали су низ недостатака који су се одразили на квалитет одливка, али и на утрошак материјала и ефикасност ливења. Унапређење технологије ливења носача зуба багера представља истраживачки задатак чије решење ће бити изложено у наставку.

4.1. ЛИВЕЊЕ У ПЕСКУ

Ливење у песку је једна од најфлексибилнијих метода технологије ливења у погледу величине, дизајна и квалитета одливка. Назив технологије ливења, потиче од тога што се у производном процесу користе калупи израђени од песка за једнократну употребу. Наиме, калупарски песак сачињен је од мешавине, углавном, кварцног песка са додатком бентонита (глине), графитног праха и воде. Квалитет одливка у извесној мери зависи од састава калупарског песка. Бентонит (глина) има функцију да повеже зрна кварцног песка чиме обезбеђује потребно јединство пешчаној мешавини. Поред наведених састојака могу се у калупарски песак додати разни адитиви који служе за побољшање потребних карактеристика. Формирана калупарска маса треба да задовољи захтеве у погледу постојаности на повишеним температурама, чврстоће, пропустљивости и калупљивости. Калупљивост је особина калупне мешавине да се да обликовати и да свој облик сачува. Пропустљивост је способност песка да пропушта гасове. Пропустљивост се повећава уколико су зрна равномерно распоређена, имају исте величине и садржај глине је што мањи. Термостабилност је особина калупне мешавине (песка) да на вишим температурама не дође до синтезовања (слепљења) и да око одливка не ствара тврду кору од песка. Термостабилност зависи од минералског и хемијског састава песка. Чврстоћа је особина песка да се супроставља деформацијама због статичких и динамичких притисака при ливењу. На чврстоћу песка утичу врста и количина глине, величина и облик зрнаца, садржај воде, начин припреме и степен сабијености калупа. Са величином зрна расте пропустљивост и постојаност на високим температурама, али пречник зрна не сме бити

већи од 0.75mm . Разликује се неколико врста песка у зависности од његових особина, на бази чега се доноси одлука који део калупа се попуњава истим:

- песок фине гранулације, који долази у непосредни додир са моделом
- песок за попуњавање крупније гранулације и
- стари или повратни калупарски песок који се добија регенерацијом већ употребљеног калупарског песка. Користи се као песок за попуњавање.

Генерално, ситнозрнаст песок је величине зрна око 0.15mm , средњезрнаст око 0.2mm , грубозрнаст око 0.3mm , и коначно врло грубозрнаст око 0.45mm и више. Најкоришћеније врсте песка су:

- **Кварцни песок** (SiO_2) углавном се користи као основна сировина за израду калупа за калуповање сивог лива, темпер лива, нодуларног лива, за ливење челика, обојених и лаких метала. Температура топљења је 1720°C .
- **Оливински песок** је магнезијум - гвожђе – ортосиликат, састоји се од форстерита (Mg_2SiO_4) и фајалита (Fe_2SiO_4). Има високу температуру топљења и користи се за калупе и за ливење сивог лива. Температура топљења 1865°C .
- **Хромитни песок** (Cr_2O_3) је веома квалитетан са температуром топљења 1900°C и у неким ливницама служи као замена за кварцни песок.
- **Цинконски песок**. Оксид цинкона (цинконијума) и силицијума (ZnSiO_4) има врло високу ватросталност са температуром топљења од $2200 \div 2600^\circ\text{C}$. Употребљава се за израду мањих језгара која су дуже време у додиру са растопљеним металом. Велику примену има и као цинконски премаз [111].

Стари песок, који се добија истресањем из већ искоришћених калупа се пре мешања са новим песком дроби, просејава, одпрашује и из њега се одвајају метални предмети и синтероване примесе. У ту сврху користе се специјалне машине, које су у већој или мањој мери аутоматизоване.

- **Аератори**. Њихова је улога да разбију грудве на ситне компоненте и да провеју разбијен песок ради одвођења прашине магнетног сепаратора. Метални опилци се даље рециклирају у поступку ливења.
- **Ротациони сто**. Ротациони сто служи за селекцију зрнаца песка и одвајање неметалних примеса из песка.
- **Отпрашивач**. Отпрашивач има намену да просејани песок добијен из ротационог сита раздвоји по гранулацији. Ту долази до раздвајања песка по величини зрна, а посебно се

издваја прашина која неповољно утиче на квалитет песка. Најчешће се врши селекција у три крупноће зрна.

- **Мешалице за песок.** У мешалицу се дозирају потребни елементи према спецификацији за добијање калупарског песка. Мешалица дроби, меље и меша песок са водом и другим додацима, стварајући хомогену смесу где глина обавија зрнца кварцног песка.
- **Растресачи песка.** Измешани песок се због садржаја влаге сабија у грудве. Због тога се пре употребе у калуповању мора растрести у фину растреситу масу у дезинтеграторима и растресачима.

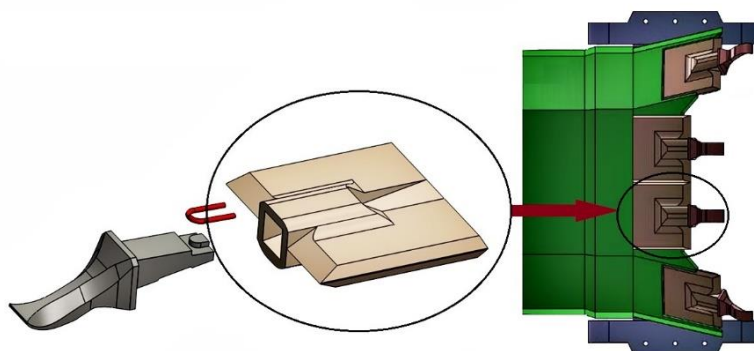
Пешчани калупи се израђују у специјалним металним кутијама, калупницама, чија је намена да задрже песок око модела. Калупници су у ствари металне кутије без дна и поклопца. Израђују се од сивог лива, челичних профила, завареног лима и других материјала. На себи садрже рукавце који служе за подизање и окретање. Калупници се увек користе у паровима, а за сложене облике и више калупника. На калупницима се налазе посебни отвори и осовинице за вођење, које се користе за спајање и учвршћивање калупница. Алати за израду калупа су веома једноставни и служе за набијање песка око модела и за прилагођавање калупа за ливење, односно за корекцију евентуалних грешака или оштећења насталих током извлачења модела (одроњавање калупарског песка). У ливачки ручни прибор спада и дрвени чекић за раздвајање модела при његовом вађењу из калупа, ручна дуваљка (мех) за издувавање песка из шупљина калупа, врећице са ликоподијумом (изолирајући прах), угљеном или графитном прашином, четкице за чишћење и квашење калупа, огледалца и светиљке за осматрање мрачних места у калупу, ливачки ексери за утискивање у пешчани калуп ради учвршћивања осетљивих делова калупа. Ради повећања продуктивности уместо алата за ручно набијање песка користе се пнеуматски набијачи песка који раде помоћу ваздуха под притиском. Модел мора бити израђен из два дела, како би се лако извукао из песка, и који се може лако склопити и раставити. Ти полумодели састављају се у тачан међусобни положај захваљујући чивијама, постављеним на раван поделе. Један део модела има чивије, док други део модела има рупе у који улазе чивије приликом склапања модела. Ради лакшег препознавања примене, модели се премазују бојом у зависности од метала који се лије: **црни модели** су за ливење сивог лива, **плави модели** су за ливење челика, **жути модели** су за ливење легура бакра, а **сиви модели** су за ливење лаких метала [112]. Ручна израда калупа користи се у малосеријској производњи и у изради компликованих калупа велике масе. Основне операције у изради калупа су: центрање модела у калупницима, пуњење и набијање песком калупницу, израда уливног система и хранилице, вађење модела,

поправак калупне шупљине и обрада премазима, улагање језгара, склапање доње и горње калупнице. Машине за калуповање могу бити са пресовањем, трескањем, вибрирањем, набацивањем и комбиноване машине (трескањем и пресовањем или вибрирањем и пресовањем) [111].

Калупарски песак није погодан за израду језгара, јер мора поседовати крутост и чврстоћу да се одупре притиску течног метала који их обухвата током уливања. Језгрени песак се прави од кварцног песка повишене ватросталности, са веома ниским садржајем глине и додатака, који служе као везивно средство мешавини. Те мешавине, печене на одређеној температури, постају тврде и чврсте издржавајући додир са растопљеним металом. Током ливења везивно средство се угљенише и зато се после хлађења распада, што омогућава лако истресање језгреног песка из шупљина одливка. Припрема песка за језгра врши се истим машинама као и за калупарски песак, с тим што се за песак за језгра не користи повратни песак већ се нови песак и потребни састојци сипају у мешалицу према датој спецификацији. После мешања песак за језгра иде у дезинтеграторе и растресаче. Отврдњавање се постиже печењем. У пракси се, у зависности од поступка ливења, примењују различита везивна средства као што су: неорганска средства (алкални силикати), органска везивна средства (ланено уље, меласа, амиди, декстрин), смоле које отврдњавају на хладно и синтетичке смоле [112]. За израду језгара користи се неколико поступака: израда у “хладној комори”, израда у “топлој кутији”, поступак уљних језгра, поступак шкољкастих језгра [111].

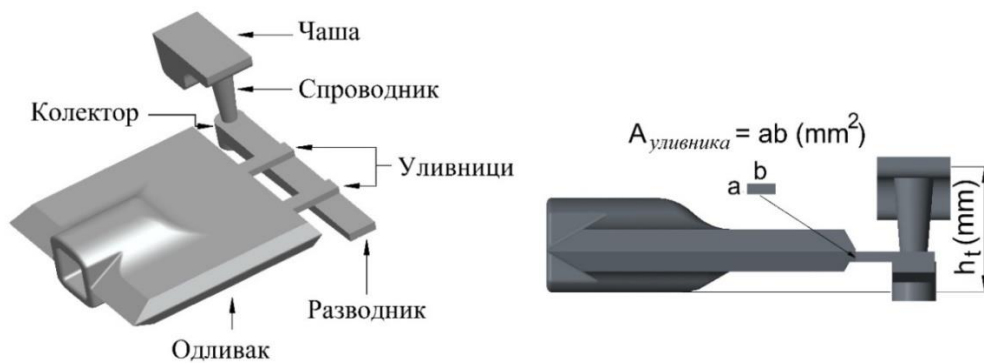
4.2. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ РЕШЕЊА УЛИВНОГ СИСТЕМА

Као што је наглашено у уводу поглавља, одливак је носач резног зуба багера, чији је CAD модел приказан на Слици 4.1. Предвиђено је да носач резног зуба буде израђен од манганског челика хемисјког састава (0.5% C, 1.4% Mn, 0.035% P, 0.035% S, 0.4% Si, 0.1% V), који је у стању да успешно савлада динамичка оптерећења и ударе.



Слика 4.1. Резни зуб, носач зуба и ведрица

Први корак у оптимизацији и дизајну уливног система је избор типа уливног система. У зависности од оријентације у односу на подеону раван уливни системи се могу поделити на вертикалне и хоризонталне. Друга подела је према положају уливника. Та подела класификује уливне системе на оне где се уливник налази на дну, подеоној линији и на врху. Према првом критеријуму поделе изабран је хоризонтални уливни систем, због добре применљивости код гравитационог ливења у песку. Према другом критеријуму изабран је уливни систем са уливником на подеоној линији калупа. Уливни систем са уливником на подеоној линији калупа карактерише висока стопа пуњења калупа у поређењу са системом код кога је уливник на дну, као и мањи ефекти турбуленција у поређењу са системом код кога је уливник на врху.

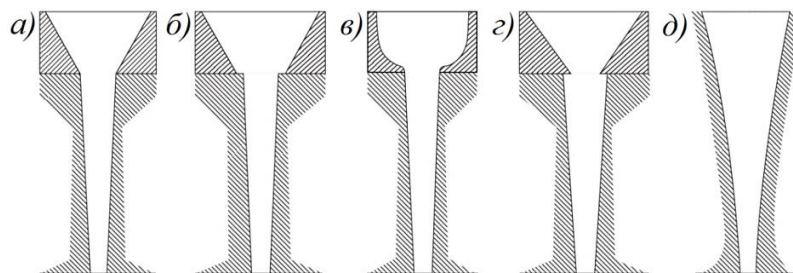


Слика 4.2. Уливни систем за ливење носача зуба

Предложени уливни систем обухвата уливну чашу, спроводник, колектор, разводник и уливнике, као елементе путање истопљеног метала од ливачког лонца до калупне шупљине.

4.2.1. Уливна чаша

Уливна чаша је први елемент уливног система који има задатак да усмери растопљени метал из ливачког лонца у спроводник. Два типа уливних чаша, које су најприсутније у конструкционим решењима уливних система, су: купаста и коритаста.

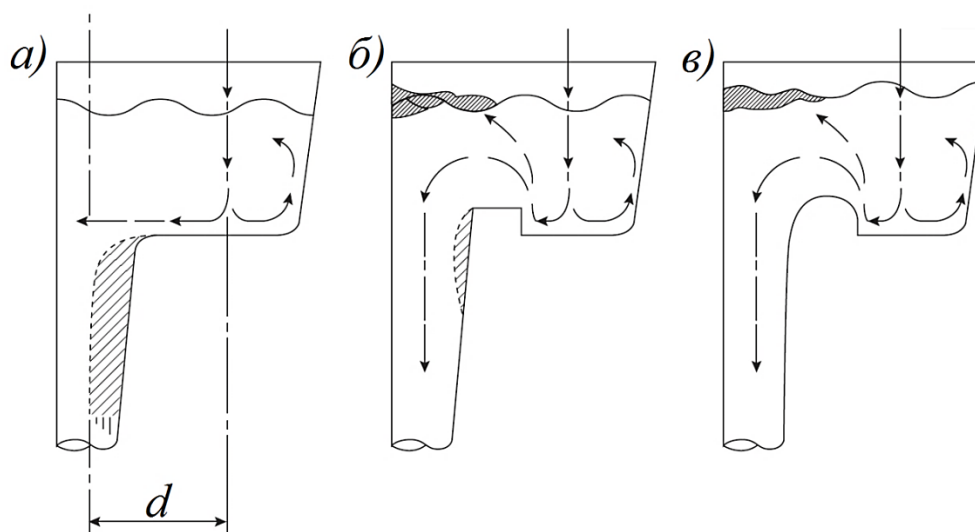


Слика 4.3. Приказ купасте чаше у комбинацији са спроводником: а) најмање штетно решење, б) превелика чаша, в) заобљена чаша, г) премала чаша и д) увећан спроводник који обједињује и чашу [113]

Џон Кембел, у својој књизи (2011), тврди да је купаста врста уливне чаше лоше решење, и да је одговорнија за лош квалитет одливка од свих осталих елемената уливног система [113]. Њене лоше карактеристике поткрепљује следећим чињеницама:

- Истопљени метал улази великом брзином, па је тешко смањити површинске турбуленције.
- Нечистоће, шљака неминовно доспевају у уливни систем.
- Присутно је увлачење ваздуха у уливни систем.
- Овај тип уливних чаша је осетљив на формирање вртлога.

Други тип уливне чаше је коритаста чаша, са “цепом“ који прима истопљени метал, који се затим, преко “брране“ прелива у први следећи елемент уливног система – спроводник. Овај тип уливне чаше омогућује издвајање нечистоћа и шљаке из истопљеног метала пре улаза у уливни систем, због мање специфичне тежине. Слепи крај чаше неутралише неконтролисану вертикалну компоненту брзине приликом сипања. Брана, која раздваја уливни део чаше од цепа, неутралише високу хоризонталну компоненту брзине, а радијус на њој обезбеђује гладак, ламинаран ток истопљеног метала у спроводник. На слици 4.4. дат је приказ три различита решења коритасте чаше.



Слика 4.4. Коритасте чаше: а) без бране (дефинитивно се не препоручује), б) оштра брана (не препоручује се) и в) заобљена брана (препоручује се) [113]

Тип коритасте чаше са заобљеном браном је изабрани тип у конкретном проблему.

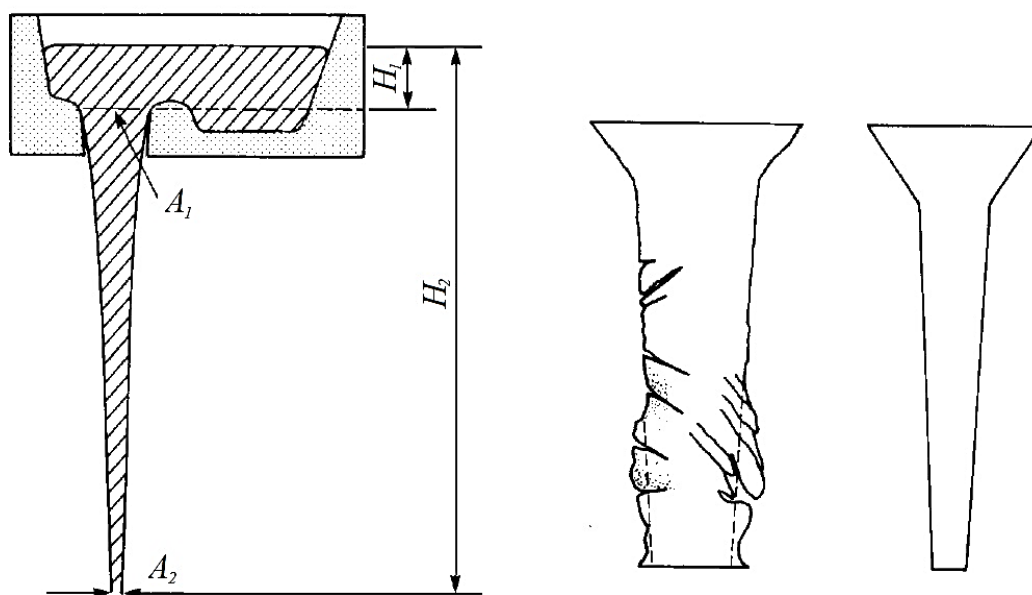
4.2.2. Спроводник

Спроводник је део уливног система који повезује уливну чашу и колектор (проширена основа спроводника). Његов задатак је комплексан, а подразумева довођење истопљеног

метала у следећи сегмент уливног система са минималним дефектима, упркос великим брзинама флуида. Највећи проблем представља висина пада дефинисана дужином спроводника, а која у значајној мери прелази критичну вредност висине. У случају да истопљени метал пада једнострано низ спроводник (спроводник униформног попречног пресека) долази до увлачења ваздуха, што проузрокује озбиљне површинске турбуленције. Решење проблема се налази у примени једначине континуитета, и у њеном значењу да је однос брзина протицања флуида кроз два различита пресека обрнуто сразмеран односу површина тих пресека.

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (4.1)$$

Конусни спроводник, чији се попречни пресек мења у складу са једначином континуитета, смањује турбуленције и могућност апсорпције ваздуха. Предност кружног попречног пресека спроводника огледа се у мањој површини изложеној хлађењу и мањем отпору протоку метала.

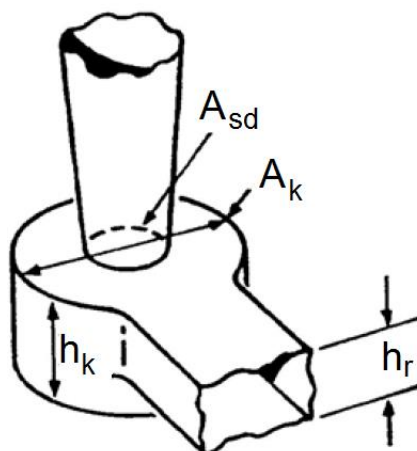


Слика 4.5. Геометрија слободног пада лива из чаше, и приказа спроводника који је претрпео велику штету увлачењем ваздуха, као и приказ спроводника без оштећења [113]

4.2.3. Колектор

Тачка излаза истопљеног метала из спроводника и почетка његовог даљег вођења кроз разводник, представљала је истраживачки изазов током низа година. Резултати спроведених истраживања су различити, и треба их прихватати са опрезом. Једно од најприсутнијих решења је колектор, чији је основни задатак да смањи увлачење ваздуха у разводник. Истраживања су обухватила проналажење величине и облика да се обезбеди

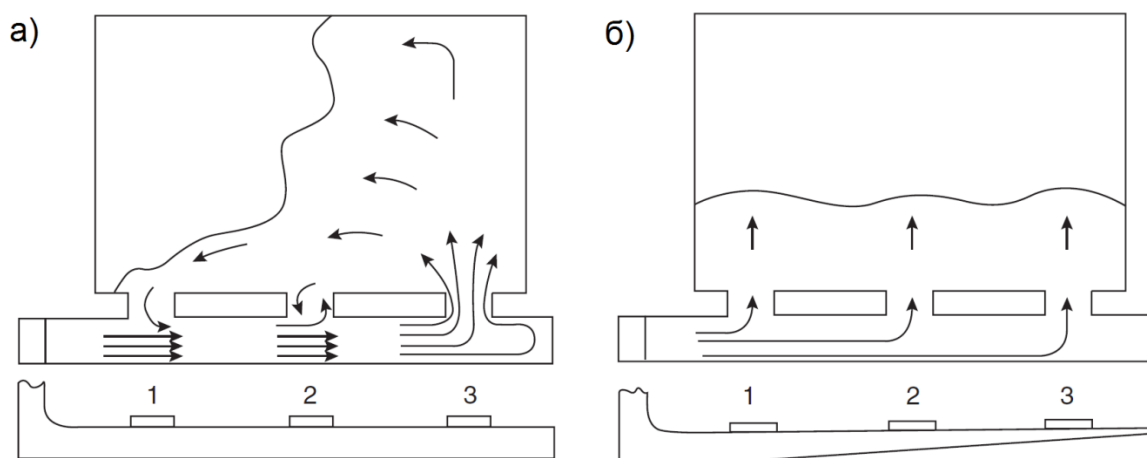
његова оптимална ефикасност. Резултат спроведених истраживања је колектор цилиндричног облика, чија је база (A_k) два пута већа од излаза спроводника (A_{sd}), а висина (h_k) два пута већа од висине попречног пресека улаза разводника (h_r) [113].



Слика 4.6. Колектор са одговарајућим геометријским величинама [7]

4.2.4. Разводник

Разводник је део уливног система који дистрибуира истопљени метал око одливка, и на тај начин омогућује брзо снабдевање калупне шупљине како би се смањило губитак топлоте. У конкретном случају, предложеном уливном систему, разводник је хоризонталан са два уливника. У оваквој поставци треба обратити пажњу на притисак и брзину флуида на местима улаза истопљеног метала у уливнике. На првом уливнику брзина је већа али је притисак мањи, док је на другом уливнику ситуација обрнута. Баланс поменутих величина на местима уливања, према препорукама еминентних истраживача, постиже се смањењем попречног пресека разводника од колектора ка његовом крају. Наиме, препорука је употреба трапезног разводника, што је и прихваћено у овом случају.



Слика 4.7. а) Небалансирана испорука истопљеног метала као последица лошег дизајна разводника, б) балансирана испорука истопљеног метала [113]

4.2.5. Уливник

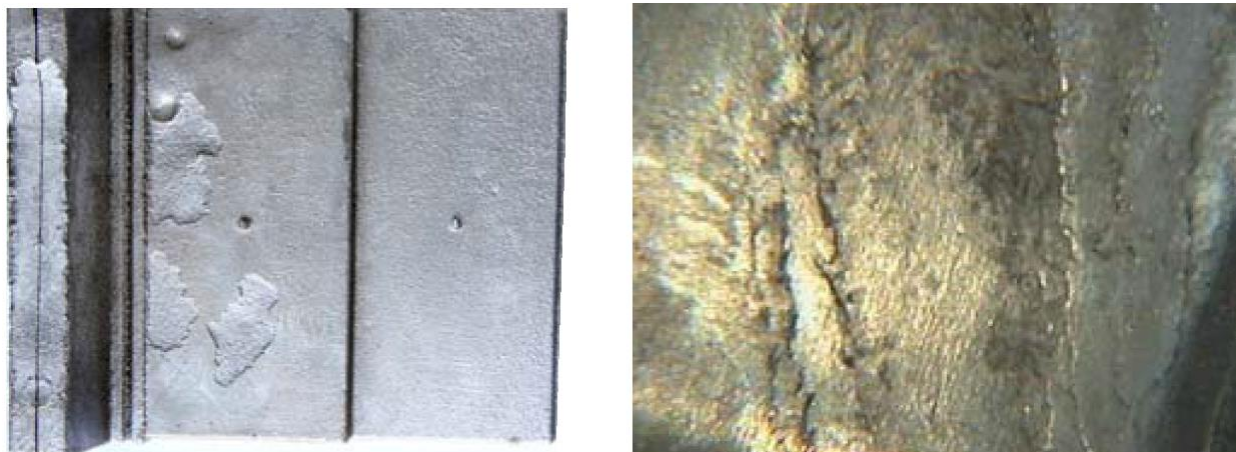
Уливник представља последњи елемент уливног система, и спаја разводник са калупном шупљином. Најчешћа је примена правоугаоних уливника. Најмању ерозију калупа изазивају полукружни уливници, међутим њихова мана је појава турбуленција. У конкретном случају изабрани су правоугаони уливници позиционирани на разводник како би били последњи елементи уливног система који се попуњавају истопљеним металом, пре транзиције истог у калупну шупљину (Слика 4.7 б).

4.3. ДЕФЕКТИ У ПРОЦЕСУ ЛИВЕЊА

Када су у питању дефекти у процесу ливења, ширина истраживања њихових узрока као и њихове елиминације, веома је опсежна. Овим подпоглављем доктората биће представљени само они дефекти који се јављају, између осталог, и као директна последица неадекватне поставке и пуњења уливног система. Наиме, лоша поставка уливног система углавном иницира веома озбиљне дефекте, као што су: непотпуно попуњавање калупа, хладни варови, гасовити и чврсти укључци.

Непотпуно попуњавање калупа, практично, значи да калупна шупљина није у потпуности попуњена. А то се манифестује, углавном, на спољним површинама одливка и у деловима одливка који су удаљени од подручја уливника. Хладни варови настају услед дисконтинуитета у фузионисању два тока флуида. Најугицајнији узроци непотпуног попуњавања калупа и појаве хладних варова су [114]:

- Неправилно димензионисање уливника, разводника и спроводника. Сви елементи уливног система требало би бити димензионисани тако да увек буду попуњени истопљеним металом током процеса ливења, и на тај начин се избегне дисконтинуитет у току истопље ног метала.
- Лоша локација уливника у систему ливења. Позиција уливника зависи од облика калупне шупљине која се попуњава, и у складу са тим треба водити рачуна да ток истопљеног метала из уливника има логичан улаз у калупну шупљину.
- Температура истопљеног метала је ниска.
- Преурањено смањење брзине сипања, умањује притисак, потребан да се калупна шупљина испуни до караја.



Слика 4.8. Непотпуно ливење (лево) и хладни вар (десно) [115]

Гасовити укључци су феномени који представљају продукт процеса хлађења одливка, током кога се унутар њега или на његовим површинама формирају гасни мехури. Гасни мехури се линијом мањег отпора померају ка областима одливка које касније очвршћавају. Општи узроци за појаву ових недостатака су:

- Уливни систем који проузрокује турбуленције, тиме што се, нпр. користи несужавајући спроводник, оштре кривине у систему разводник – уливник итд.
- Уливни систем који изазива дисконтинуиран проток метала.
- Неправилан дизајн уливне чаше, који омоућава увлачење ваздуха у ток метала. Наиме, општа препорука је избегавање купасте чаше као решења, јер ствара вртлоге.
- Уливни систем није пун. У случају више уливника неопходно је користити трапезни разводник и колектор, како би уливни канали били пуни истопљеним металом без укључака оксида.

Чврсти укључци су директна последица турбуленција истопљеног метала током пуњења, а манифестују се као укључци песка и укључци шљаке. Укључци песка се генеришу током турбулентног кретања истопљеног метала у каналима уливног система. Укључци шљаке су узроковани површинским турбуленцијама дуж путање истопљеног метала. Правилна геометрија уливног система има веома значајну улогу у елиминисању турбуленција, а поред геометрије уливног система очигледно постоје и други разлози за појаву нежељених укључака. Акцент овог поглавља доктората је на бављењу геометријом уливног система и други разлози, као што су састав метала, топљење и пуњење, калуповање песка, језгара неће бити разматрани детаљно, а заинтересовани читалац би требало да погледа референце [103, 113].

4.4. МЕТАХЕУРИСТИЧКА ОПТИМИЗАЦИЈА УЛИВНОГ СИСТЕМА

Оптимизација процеса ливења је предмет бројних истраживања спроведених до сада, а све у циљу задовољења квалитативних карактеристика производа и повећања ефикасности и економичности процеса. Приступу решавању оптимизационих проблема у овој области су различити, у зависности од параметара процеса који се оптимизују, као и од коришћених оптимизационих техника. Као што је истакнуто у литературном прегледу, већина доступних истраживања бави се проблемима локације уливника у систему ливења, минимизацијом брзине истопљеног метала у уливнику, минимизацијом деформација, оптимизацијом позиције, типа и запреминских карактеристика хранитеља, итд. За разлику од литературно доступних истраживања, истраживање спроведено под окриљем ове докторске дисертације бави се максимизацијом стопе пуњења калупа, употребом двеју оптимизационих техника: генетски алгоритми (*Genetic algorithm*) и оптимизација ројем честица (*Particle Swarm Optimization – PSO*). Максимизација стопе пуњења калупа је од посебног значаја за танке и дуге одливке који брзо губе топлоту, а већа брзина пуњења калупа помаже да се елиминишу појаве хладних варова и шупљина. Дакле, примарни циљ оптимизације, у конкретном случају, је да максимизује брзину пуњења калупа, узимајући у обзир дефинисана ограничења. Резултат оптимизационог процеса су димензионе карактеристике уливника и висина ливења, на бази којих се дефинише целокупна геометрија уливног система.

4.4.1. Дефинисање функције циља

Дефинисање функције циља представља један од најзначајних корака у оптимизационом процесу. Циљ оптимизације је максимизирање брзине пуњење калупа (v), која је дата следећом релацијом:

$$v = \rho_m A_{ingate} V_{ingate} \quad (4.2)$$

где је: ρ_m – густина истопљеног метала, A_{ingate} – попречни пресек уливника, V_{ingate} – брзина истопљеног метала на уливнику. Обзиром на мале варијације густине метала изнад тачке топљења, у овој анализи је $\rho_m = const.$. Дакле, брзина пуњења калупа зависи од попречног пресека уливника (A_{ingate}) и брзине истопљеног метала на месту уливника (V_{ingate}). Повећање брзине пуњења калупа имплицира смањење времена пуњења калупа. На основу тога минимизирање времена пуњења дато релацијом (4.3) представља функцију

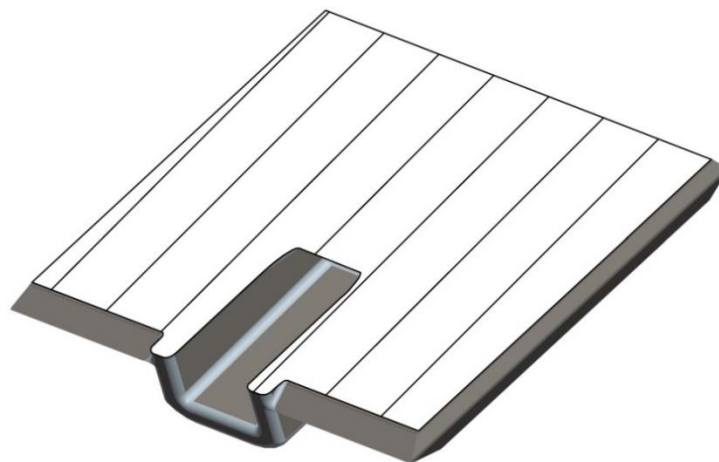
циља оптимизације. Укупно време пуњења калупа може се одредити интеграцијом времена пуњења сваког слоја калупа од дна до врха.

$$\tau_f = \int_0^{h_{cast}} \frac{A_i(h)}{\sum_j A_{ingate-j} \cdot V_{ingate-j}} dh \quad (4.3)$$

где је: $A_i(h)$ површина попречног пресека одливка у функцији висине одливка, $A_{ingate-j}$ и $V_{ingate-j}$ су попречни пресек и тренутна брзина истопљеног метала, респективно j -ог уливника, h_{cast} је висина одливка, чија је вредност $90mm$. Како су предвиђена два уливника истог попречног пресека, $A_{ingate} = a \cdot b$ и брзина $V_{ingate} = \sqrt{2g \cdot (h_t - h)}$, време пуњења калупа је дато следећом релацијом:

$$\tau_f = \frac{1}{2ab\sqrt{2g}} \int_0^{h_{cast}} \frac{A_i(h)}{\sqrt{h_t - h}} dh \quad (4.4)$$

где је: g – гравитационо убрзање, h_t – растојање између дна одливка и нивоа истопљеног метала у уливној чаши (Слика 4.2). Попречни пресек одливка $A_i(h)$ је променљивог карактера, у зависности од висине одливка. Израчунавање функције $A_i(h)$ је наредни корак у добијању функције циља. Креирањем попречних пресека (са кораком $\Delta h = 1mm$) на *CAD* моделу одливка добијене су вредности површина поречних пресека на одговарајућој висини одливка, (Слика 4.9 и Табела 4.1).



Слика 4.9. Попречни пресек одливка $A_i(52mm) = 78041.27mm^2$

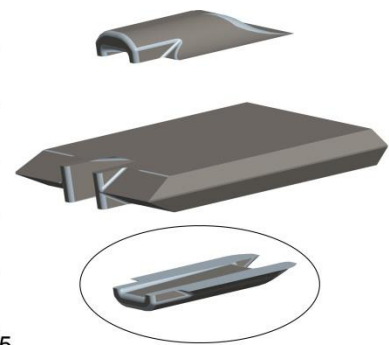
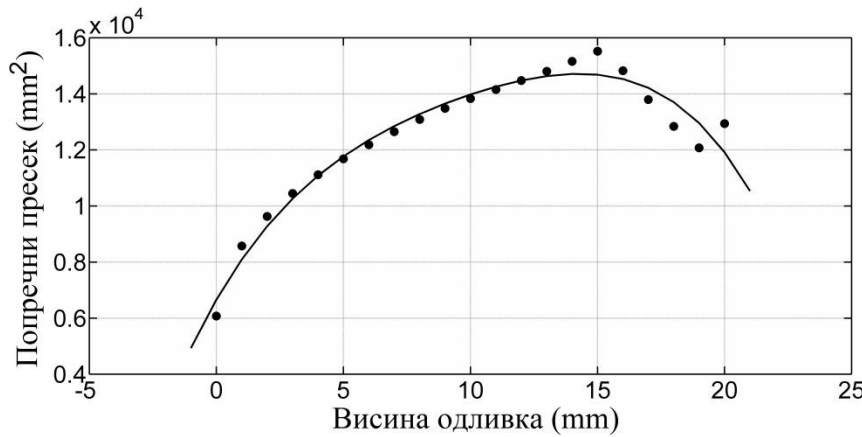
У Табели 4.1 дате су неке од вредности површина попречних пресека, добијене анализом *CAD* модела одливка.

Табела 4.1. Неке од вредности површина попречног пресека

$h(mm)$	$A(mm^2)$	$h(mm)$	$A(mm^2)$	$h(mm)$	$A(mm^2)$
0	6077.58	48	80138.21	84	8977.42
1	8575.50	49	79605.98	85	8340.68
2	9627.27	50	79079.07	86	7638.00
3	10444.50	51	78557.51	87	6845.75
4	11111.12	52	78041.27	88	5922.57
5	11679.46	53	77530.37	89	4760.36
6	12184.11	54	77025.96	90	2230.27
...		

Интерполацијом добијених вредности, помоћу три полинома у одговарајућим границама, добија се функција промене попречног пресека према висини одливка. Првом релацијом добијена је промена попречног пресека у границама од 0 до 21mm.

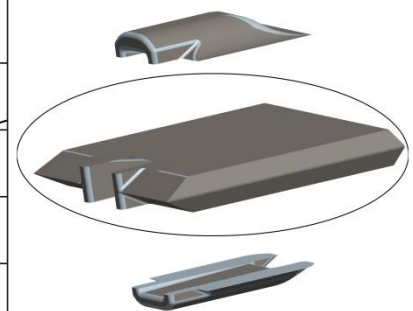
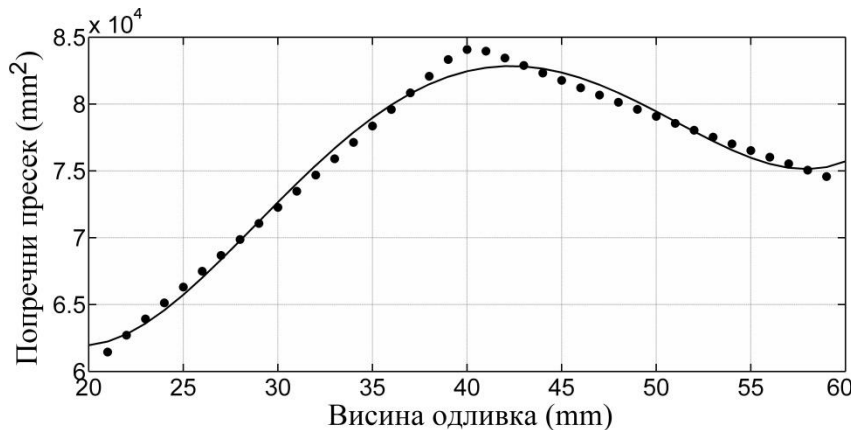
$$A_f(0-21) = -0.39h^3 - 33.9h^2 + 1095h + 7032 \tag{4.5}$$



Слика 4.10. Графички приказ функције $A_f(0-21)$

Другом релацијом добијена је промена попречног пресека у границама од 21 до 60mm.

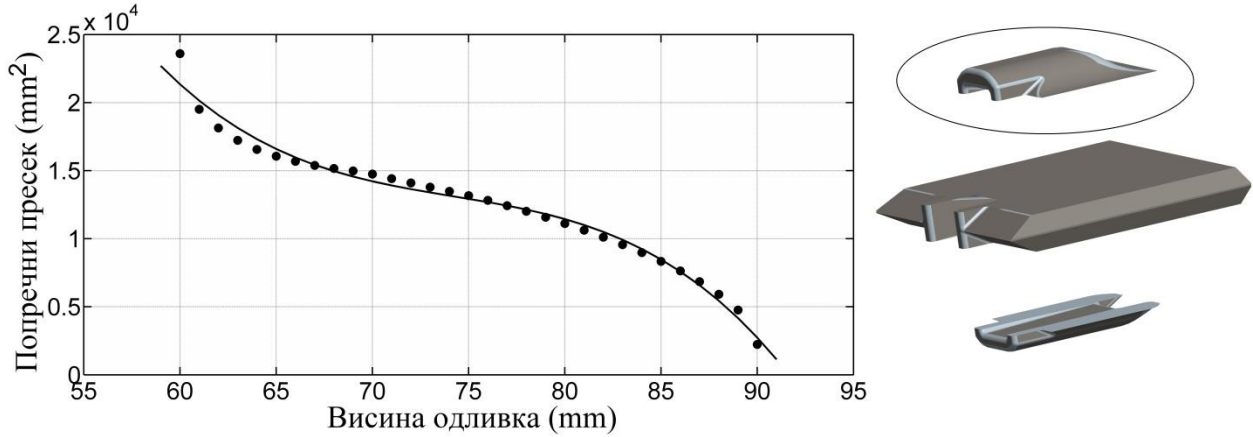
$$A_f(21-60) = 0.1h^4 - 16h^3 + 884.84h^2 - 19285h + 205672.2 \tag{4.6}$$



Слика 4.11. Графички приказ функције $A_f(21-60)$

Коначно, трећа релација представља промену попречног пресека у опсегу висина од 60 до 90mm.

$$A_i(60-90) = -1.7h^3 + 381.89h^2 - 28579h + 731728.18 \quad (4.7)$$



Слика 4.12. Графички приказ функције $A_i(60-90)$

Уврштавањем релација које представљају промену попречног пресека по висини одливка у релацију (4.4), добија се релација (4.8).

$$\tau_f = \frac{1}{2ab\sqrt{2g}} \left(\int_0^{21} \frac{A_i(0-21)}{\sqrt{h_t-h}} dh + \int_{21}^{60} \frac{A_i(21-60)}{\sqrt{h_t-h}} dh + \int_{60}^{90} \frac{A_i(60-90)}{\sqrt{h_t-h}} dh \right) \quad (4.8)$$

Решавањем сваког интеграла појединачно и враћањем њихових решења (4.9, 4.10 и 4.11) у (4.8), добија се коначан израз функције циља (4.12).

$$I_1 = \int_0^{21} \frac{A_i(0-21)}{\sqrt{h_t-h}} dh = \sqrt{h_t} \left(-0.36h_t^3 - 36.16h_t^2 + 1460h_t + 14064 \right) - \sqrt{h_t-21} \left(-0.36h_t^3 - 39.9h_t^2 + 1021.4h_t + 22382.1 \right) \quad (4.9)$$

$$I_2 = \int_{21}^{60} \frac{A_i(21-60)}{\sqrt{h_t-h}} dh = \sqrt{h_t-21} \left(0.08h_t^4 - 13.8h_t^3 + 803.7h_t^2 - 17986.64h_t + 259430.9 \right) - \sqrt{h_t-60} \left(0.004h_t^4 - 12.2h_t^3 + 614.69h_t^2 - 11660.8h_t + 214699.7 \right) \quad (4.10)$$

$$I_3 = \int_{60}^{90} \frac{A_i(60-90)}{\sqrt{h_t-h}} dh = \sqrt{h_t-90} \left(1.55h_t^3 - 337.4h_t^2 + 24495.8h_t - 631957.5 \right) - \sqrt{h_t-60} \left(1.55h_t^3 - 360.7h_t^2 + 27983.14h_t - 765306.9 \right) \quad (4.11)$$

$$\tau_f = \frac{I_1(h_t) + I_2(h_t) + I_3(h_t)}{2ab\sqrt{2g}} \quad (4.12)$$

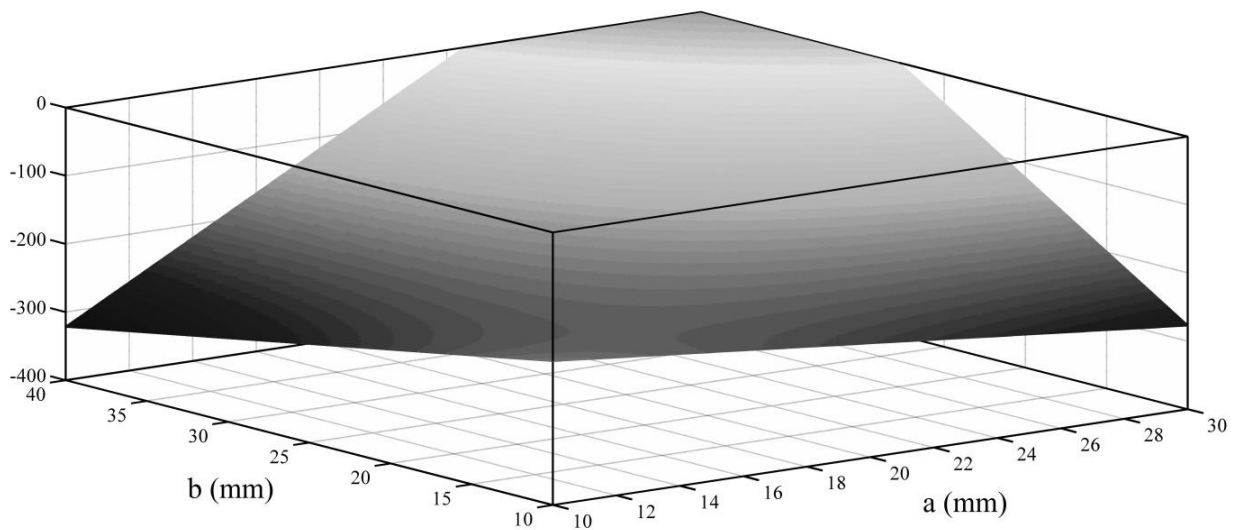
4.4.2. Дефинисање ограничења

Ограничења оптимизационог процеса дефинисана су модулом уливника, Рејнолдсовим бројем, као и геометријом и димензијама одливка и предвиђеног уливног система. Прво ограничење је модул уливника, који мора бити мањи или једнак од модула одливка.

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{ingate} \leq M_{casting_part} \\ n \left(\frac{A_{ingate}}{P_{ingate}} \right) \leq \left(\frac{V_{casting_part}}{A_{casting_part}} \right) \end{array} \right\} \quad (4.13)$$

Где су: n – број уливника, A_{ingate} – попречни пресек уливника, P_{ingate} – обим уливника, $V_{casting_part}$ – запремина одливка, $A_{casting_part}$ – површина одливка. Број предвиђених уливника је два, а анализом CAD модела одливка добијене су вредности: $V_{casting_part} = 3661113.8mm^3$ и $A_{casting_part} = 253716.66mm^2$. Попречни пресек и обим уливника су: $A_{ingate} = ab$, $P_{ingate} = 2(a + b)$. Уврштавањем наведених величина у релацију (4.12) добија се коначна форма ограничења дата релацијом (4.14).

$$ab - 14.43 \cdot (a + b) \leq 0 \quad (4.14)$$



Слика 4.13. Домен претраге дефинисан првим ограничењем

Друго ограничење је Рејнолдсов број, који представља однос сила инерције (F_i) и вискозности (F_v), и дефинише границу између ламинарног и турбулентног струјања (4.15).

$$Re = \frac{F_i}{F_v} = \frac{\rho V_{ingate} d}{\mu} \quad (4.15)$$

где су: μ – динамичка вискозност истопљеног метала, d – карактеристична дужина, дата релацијом (4.16).

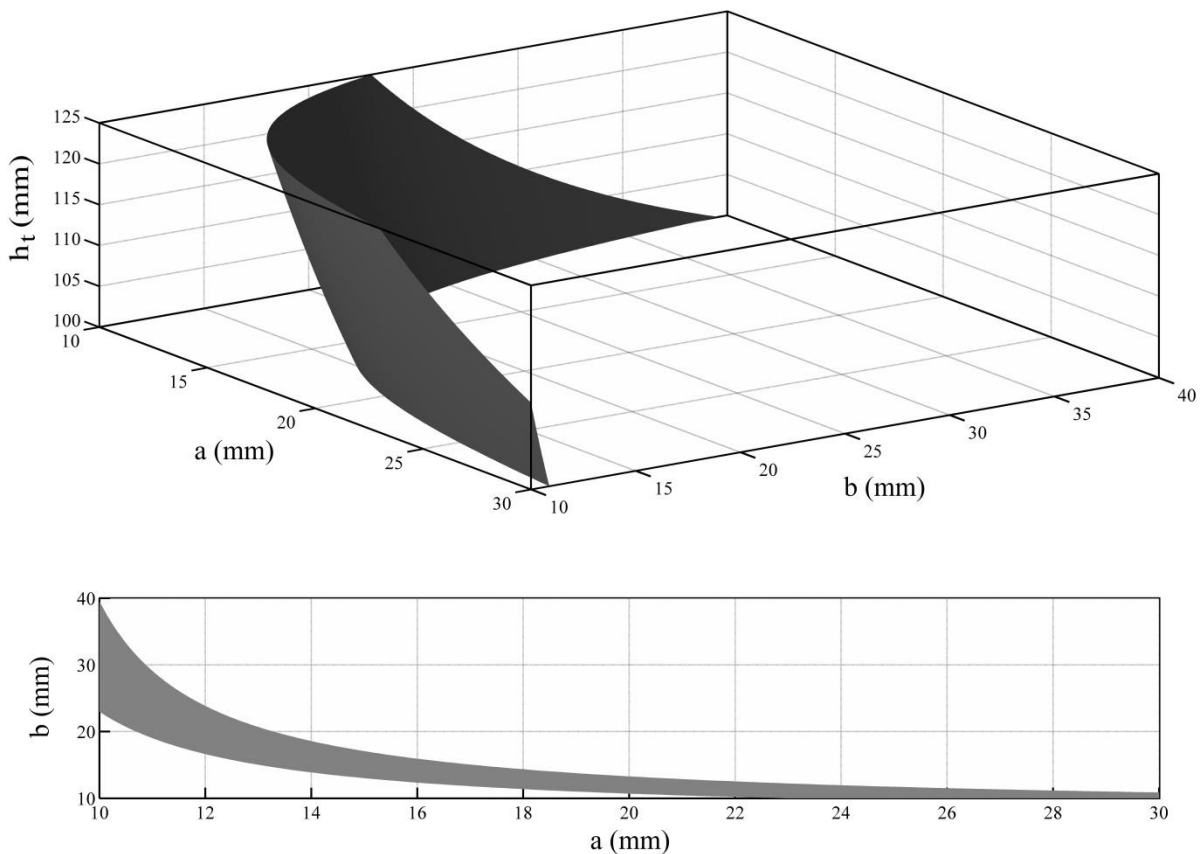
$$d = \frac{4A_{ingate}}{P_{ingate}} = \frac{4ab}{2(a+b)} = 2 \frac{ab}{a+b} \quad (4.16)$$

Висока вредност Рејнолдсовог броја доводи до турбулентног струјања флуида. У циљу избегавања турбулентног струјања Рејнолдсов број би требало да буде мањи од 20000 [116]. Узимајући у обзир ову чињеницу, и повезивањем (4.15) и (4.16) добија се релација (4.17).

$$Re = 2 \frac{\rho}{\mu} \sqrt{2g} \frac{ab\sqrt{h_t - 20}}{a+b} \leq 20000 \quad (4.17)$$

Вискозност челика је $\mu = 7 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{ms}$, а густина је $\rho = 7000 \frac{kg}{m^3}$. Уврштавањем наведених вредности у релацију (4.17) добија се коначно ограничење дато релацијом (4.18).

$$ab\sqrt{h_t - 20} - 71.4(a+b) \leq 0 \quad (4.18)$$



Слика 4.14. Домен претраге дефинисан другим ограничењем

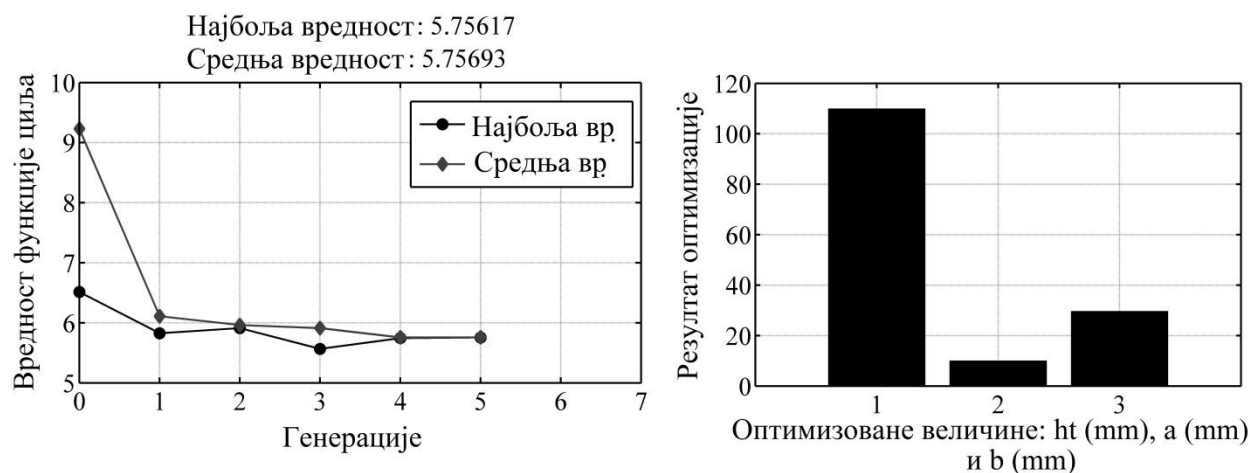
Треће ограничење проистиче из облика и димензионих карактеристика одливка, а самим тим и предвиђеног уливног система. Наиме, у Табели 4.2. дат је опсег претраге величина које се оптимизују, тј. димензије уливника и висина ливења.

Табела 4.2. Домен претраге оптималних вредности

	a (mm)	b (mm)	h _t (mm)
Доња граница	10	10	100
Горња граница	30	30	130

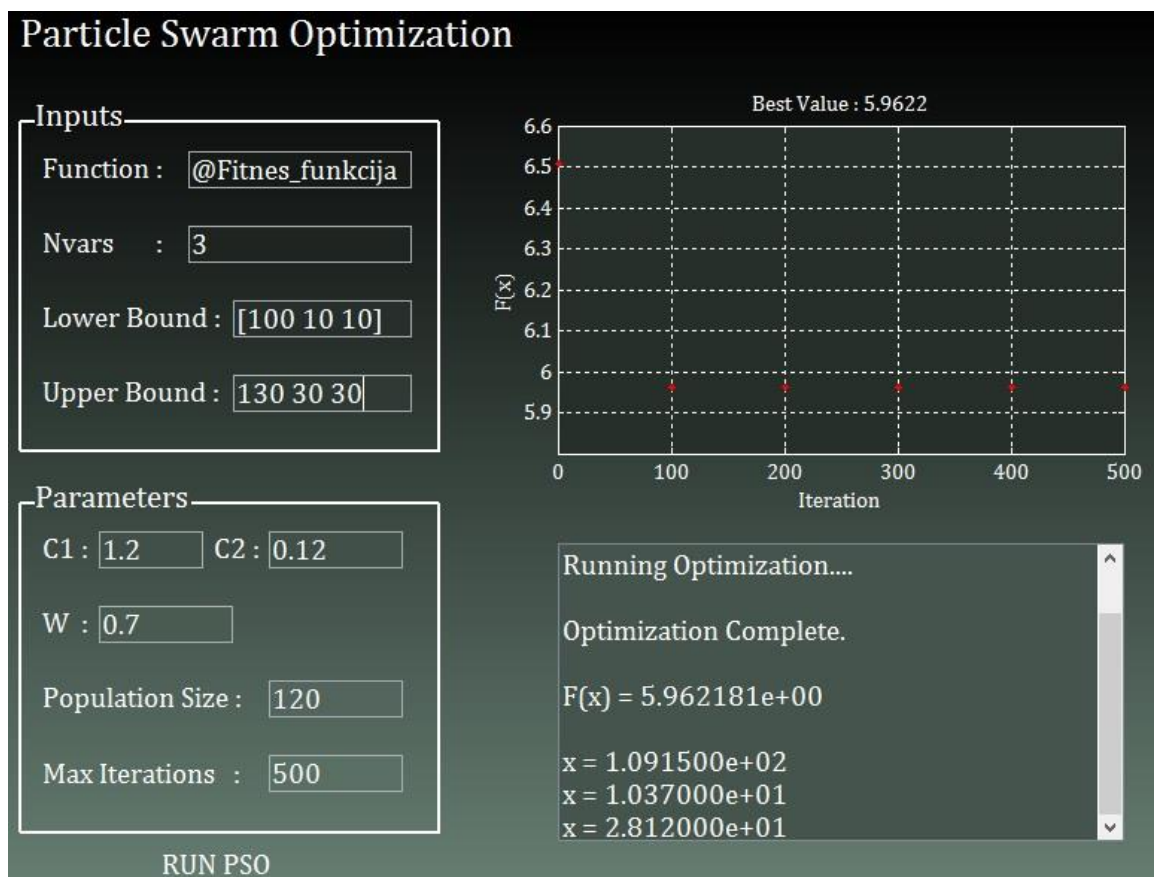
4.4.3. Оптимизациони процеси и њихова решења

Дефинисањем функције циља и простора претраге специфицираним постављеним ограничењима, испуњени су основни предуслови за спровођење оптимизационог процеса димензионих карактеристика уливника и висине ливења. Прва примењена оптимизациона техника из породице природом инспирисаних метахеуристичких алгоритама, је генетски алгоритам. Величина популације, генетског алгоритма је 120 јединки, а максималан број генерација је 500. Алгоритам коришћен у селекцији је стохастичко универзално узорковање. Популација се посматра као да је мапирана на рулет – точак, већи делови точка припадају оним стринговима који имају мањи *fitness* (јер се ради о минимизационом проблему). На рулет се равномерно поставља *N* показивача, где је *N* број јединки у популацији. Једним окретањем рулета формира се популација. Као оператор укрштања коришћено је униформно укрштање. “*Crossover fraction*“ дефинише део нове популације који је настао укрштањем (без елитних јединки), и његова вредност се креће између 0 и 1. Број елитних јединки које се преносе у нову генерацију је 2. Генетски алгоритам зауставља свој рад већ у петој генерацији јер су прекршена задата ограничења. Вредност функције циља која представља минимизовано време пуњења калупа је 5.75s, а добијене оптимизоване вредности су следеће: $h_t = 110.53mm$, $a = 10mm$ и $b = 29.98mm$.



Слика 4.15. Резултати оптимизације генетским алгоритмом

Када је у питању оптимизација ројем честица *PSO*, величина популације је као и код ГА постављена на 120 јединки, а максималан број генерација на 500. На слици 4.16. дат је приказ завршеног оптимизационог процеса са вредностима одговарајућих параметара као што су *C1* – коефицијент когнитивног учења (утицај искуства честице), *C2* – коефицијент социјалног учења (утицај искуства роја), *W* – параметар инерције, који контролише утицај претходних брзина честице на тренутну.



Слика 4.16. Оптимизација ројем честица

На крају оптимизационог процеса ројем честица вредност функције циља која представља минимзовано време пуњења калуца је $5.96s$, а добијене оптимизоване вредности су следеће: $h_t = 109.15mm$, $a = 10.37mm$ и $b = 28.12mm$. Усвојене вредности оптимизованих величина након спровођења два оптимизациона процеса су: $h_t = 110mm$, $a = 10mm$ и $b = 30mm$.

Примењене оптимизационе технике су изабране због њихове популарности у академским круговима и у индустрији, јер их краси интуитивност, лакоћа примене, способност да ефикасно реше високо нелинеарне оптимизационе проблеме, карактеристичне за сложене инжењерске проблеме. Примењене технике оптимзације имају неке сличности, као што су произвољно генерисана почетна популација, а затим и

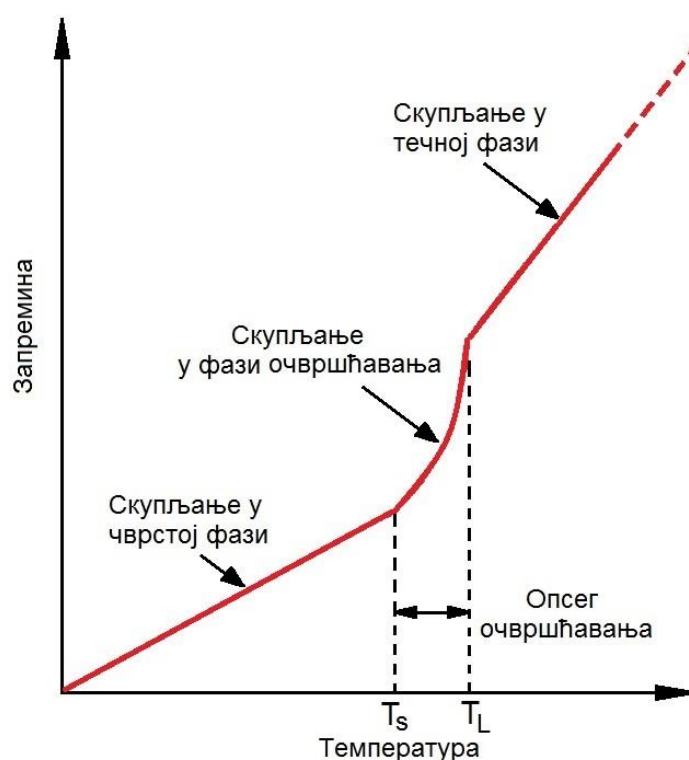
употреба функције циља у процени ваљаности јединки популације. Обе технике су показале висок ниво ефикасности, на малом простору претраге, који је дефинисан прецизним ограничењима. Добијена решења су слична, између осталог, и због тога што оптимизована функција има само глобални минимум. А општи утисак након спровођења оптимизационих процеса је да оптимизација ројем честица надмашује генетске алгоритме у смислу ефикасности, када је у питању оптимизација неограничених нелинеарних проблема. Ако је пак нелинеарни проблем ограничен, тада је предност у смислу ефикасности на страни генетских алгоритама.

На бази усвојених вредности оптимизованих величина након спровођења два оптимизациона процеса (димензија уливника и висине ливења) дефинисана је целокупна геометрија уливног система. Да би се стартовало са димензионим дефинисањем елемената уливног система, поред познавања вредности попречног пресека уливника, потребно је одлучити се за један од два система пуњења. Чувени истраживачи *Johnson, Bishop и Pellini* су 1954. године дефинисали поделу система пуњења на: системи под притиском и системи без притиска [113]. У овом случају дизајнирања уливног система изабран је систем под притиском. Разлика између система под притиском и система без притиска је у избору локације пригушнице, којом се контролише проток истопљеног метала кроз уливни систем. Систем под притиском подразумева пригушење тока истопљеног метала на улазу у уливник, то практично значи да је попречни пресек уливника мањи од попречних пресека разводника и спроводника. Овакав систем карактерише елиминисање ваздуха из канала уливног система, висока стопа пуњења, али и турбулентнији проток истопљеног метала кроз уливни систем. Код система без притиска пригушење се налази на излазу из спроводника, и најмањи попречни пресек је управо на том месту. Оба система пуњења карактеришу одговарајући односи попречних пресека спроводника (A_s), разводника (A_r) и уливника (A_u). *Campbell J.* (2011) даје две препоруке за систем под притиском. Прва је: $A_s:A_r:A_u=1:0.8:0.6$, а друга је: $A_s:A_r:A_u=1:1:0.8$. На бази вредности добијене оптимизационим процесима, $A_u \approx 300\text{mm}^2$, и користећи прву препоруку димензионисани су разводник и спроводник, $A_r=400\text{mm}^2$ и $A_s=500\text{mm}^2$. Преостали елементи уливног система, тј. колектор и уливна чаша дизајнирани и димензионисани су на бази већ димензионисаних елемената и у складу са литературним препорукама датим у подпоглављу 4.2.

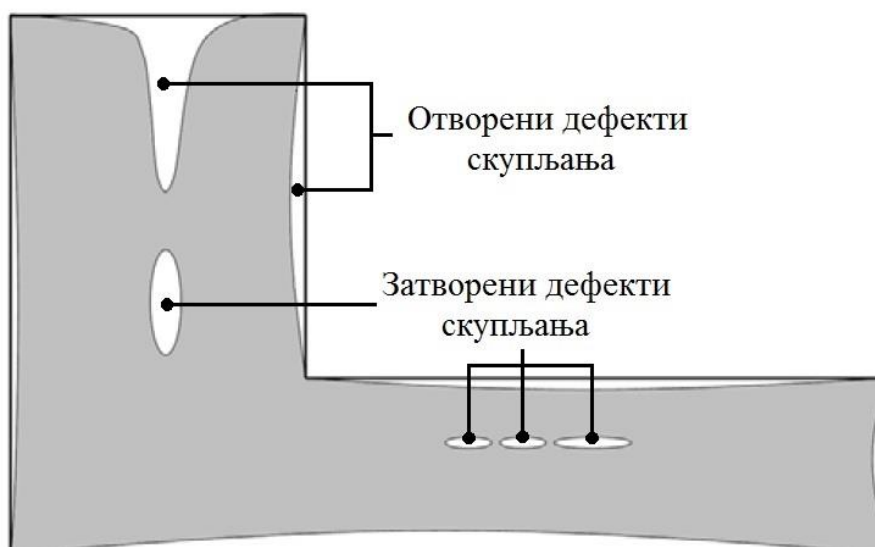
4.5. ОЧВРШЋАВАЊЕ И ХРАЊЕЊЕ ОДЛИВКА

Хлађење одливка проузрокује запреминско скупљање метала, па је неопходно дизајнирати хранитеље са основном функцијом да током очвршћавања надокнађују

одливку мањак метала. За разлику од пуњења, које је релативно кратак процес, храњење је дуг, спор и неопходан процес приликом хлађења одливка. Током хлађења присутне су три различите фазе контракције запремине, тј. скупљања: скупљање у течној фази, скупљање током очвршћавања и скупљање у чврстој фази (Слика 4.17). Контракција запремине се манифестује кроз нежељене појаве: унутрашње шупљине, површинске деформације, површински кратери. Један од показатеља квалитета процеса ливења јесте непрекидност тока истопљеног метала у области очвршћавања која се храни и надокнађује дефицит изазван очвршћавањем. Неуспех у овом процесу резултираће недостацима процеса очвршћавања, који се називају порозност. Како постоје многе врсте порозности и њихова анализа је обимног карактера, оне неће бити обрађене кроз дисертацију, а за детаљније анализе читаоц се упућује на књиге *Cambell-a* и *Frederiksson-a* [117,118]. На слици 4.18 дата је само уопштена класификација порозности, као последице скупљања метала. Отворени дефекти као последица скупљања метала, су резултат хлађења док је метал у течном стању и за време очвршћавања. Ови дефекти су велике запремине па се називају макро скупљање. Затворени дефекти скупљања се манифестују као унутрашња макропорозност и унутрашња микропорозност. Отворени дефекти су искључиво везани за процес скупљања метала, док су затворени дефекти, поред процеса скупљања метала, у директној вези и са нуклеацијом и растом зрна, као карактеристикама кристализације.



Слика 4.17. Шематски приказ три форме скупљања: у течној фази, фази очвршћавања и чврстој фази [113]



Слика 4.18. Отворени и затворени дефекти као последица скупљања метала [119]

Елиминисање наведених нежељених појава реализује се правилним дизајнирањем хранитеља који се након хлађења уклањају са одливка. Истражујући бројне литературне изворе, као општи закључак намеће се следећи редослед активности приликом пројектовања система храњења одливка [120]:

- Извршити уопштавање геометрије одливка, представљајући га као скуп једноставних плочастих облика.
- Утврдити потенцијална топла места на сваком сегменту дискретизованог модела одливка.
- Предложити зоне и утврдити путању храњења одливка.
- Утврдити дистанце храњења, тј. домет храњења одливка.
- Димензионисати хранитеље.

У оквиру наведеног редоследа инкорпорирана су правила о ваљаној исхрани одливка, а која *Cambell* систематично излаже у својој књизи [113]. Бројни литературни извори се углавном базирају на два правила храњења одливка:

- Хранитељ мора очврснути, најраније, у исто време када и одливак, или наравно касније. Ово правило је *Chvorinov's* критеријум преноса топлоте.
- Хранитељ мора садржати довољно истопљеног метала, да одливку надокнади запреминско скупљање метала, у оном опсегу за који је поменути хранитељ предвиђен.

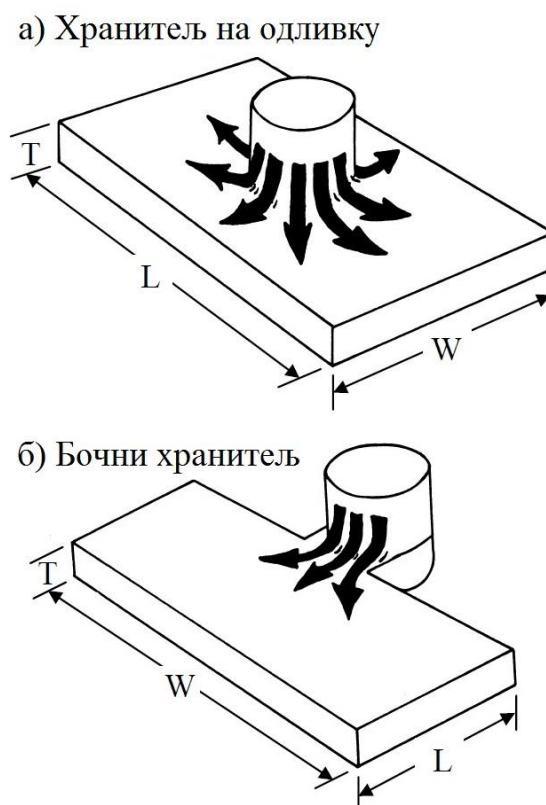
Поред ових, круцијалних правила, постоје и друга правила заснована на температурним и геометријским критеријумима, као и критеријуму притиска, која играју веома важну улогу за стабилност процеса солидификације и замрзавања метала. Примена наведених

активности и правила биће саставни део метахеуристичке оптимизације система храњења носача зуба багера, изложене у наредном подпоглављу.

4.6. МЕТАХЕУРИСТИЧКА ОПТИМИЗАЦИЈА ХРАНИТЕЉА

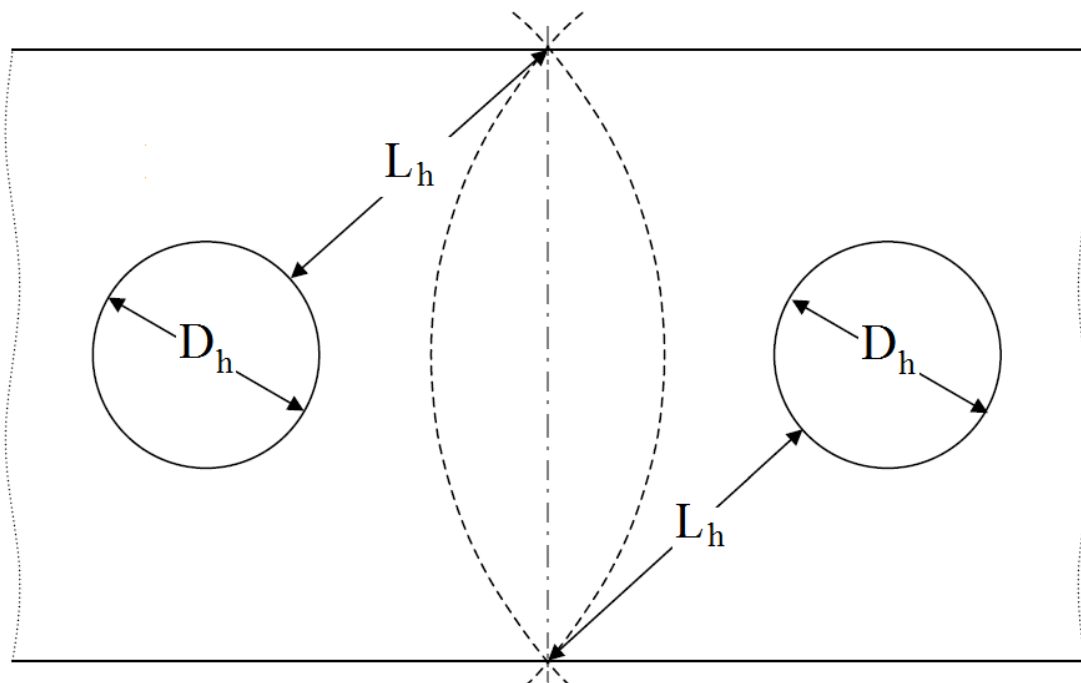
Метахеуристичка оптимизација хранитеља представља својеврсну синтезу изложених правила и активности приликом пројектовања система храњења, уграђених у стандардне субјекте оптимизације као што су функција циља и одговарајућа ограничења. Као оптимизационе технике, такође, коришћени су природом инспирисани метахеуристички алгоритми, објашњени у другом поглављу доктората: генетски алгоритми (*Genetic algorithm*) и оптимизација ројем честица (*Particle Swarm Optimization*).

Пре формирања функције циља и ограничења неопходан је избор позиције, типа и броја хранитеља у систему ливења. Позиција и број хранитеља зависи од геометрије и димензионих карактеристика одливка. На слици 4.19. представљене су две могуће позиције храњења одливка, исхрана одозго и бочна исхрана. У конкретном случају, када се ради о носачу зуба багера, он је најпре апроксимиран једном плочом димензија $295 \times 320 \times 40 \text{ mm}$, а за позицију исхране одливка изабрана је варијанта исхране одозго, дакле позиција хранитеља на одливку.



Слика 4.19. Позиционирање система храњења а) хранитељ на одливку и б) бочни хранитељ [120]

Изабрани тип хранитеља је цилиндрични отворени хранитељ јер има највећи модул (цилиндар има најмању површину по запремини). Број хранитеља зависи од ширине подручја дејства хранитеља. На слици 4.20. дат је приказ два симетрична цилиндрична хранитеља са пречницима D_h и дужинама дејства исхране L_h .



Слика 4.20. Симетрични цилиндрични хранитељи и њихово дејство исхране одливка

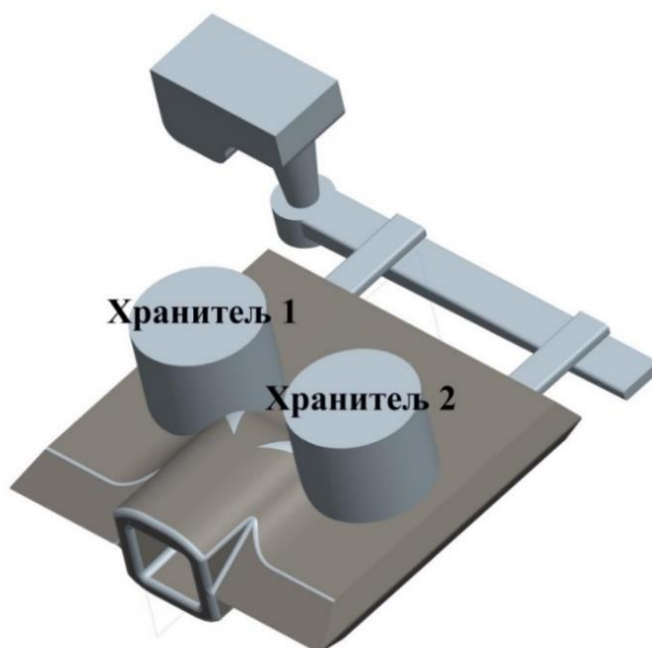
Ширина подручја дејства хранитеља представљала је истраживачки изазов за велики број истраживача. Направљени су бројни експерименти како би се пронашла оптимална величина подручја дејства за одговарајући хранитељ. Истраживачки тим из Лабораторије за материјале из Вашингтона, предвођен Пелинијем, предложио је једноставну релацију која успоставља везу између домета исхране L_h и дебљине одливка T , дакле:

$$L_h = 4.5T \quad (4.19)$$

Узимањем у обзир вредности апроксимираних димензија одливка ($T = 40mm$), добијен је домет исхране у конкретном случају (4.20).

$$L_h = 4.5 \cdot 40mm = 180mm \quad (4.20)$$

Димензије основе одливка ($295 \times 320mm$), као и његова геометрија сугеришу употребу два симетрична цилиндрична хранитеља намењена за надокнаду запремине настале скупљањем метала. Њихова позиција у систему ливења приказана је на слици 4.21.



Слика 4.21. Предложени уливни систем са хранитељима

У конкретном случају није предвиђена употреба хладила, а ако се пак употребе на крајевима одливка, са циљем да поспеше усмерено очвршћавање, тада релација 4.19, има следећи облик:

$$L_h = 4.5T + 50mm \quad (4.21)$$

Након дефинисања броја, типа и позиције хранитеља, наредни корак је дефинисање њихових димензионих карактеристика, кроз оптимизациони процес. Наиме, проналажење оптималних вредности пречника и висине хранитеља је суштински циљ оптимизације, чије је остварење изложено у наставку.

4.6.1. Дефинисање функције циља

Функција циља формирана је сагласно другом правилу храњења одливка, које *Cambell* излаже у својој књизи, а које гласи да време замрзавања у хранитељу мора бити најмање онолико дуго колико је дуго време замрзавања одливка [113]. Време очвршћавања може се предвидети употребом *Chvorinov*-ог правила датог релацијом 4.22.

$$t_s = C \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (4.22)$$

Где су: t_s – време очвршћавања, C – константа калупа, V – запремина метала и A – одговарајућа површина дела који очврћава. Хранитељ има задатак да компезује запреминско скупљање одливка, и требало би да буде последња карика у ланцу усмереног очвршћавања. Најдуже време очвршћавања имају они делови који имају минималну површину. Цилиндар има најмању површину у односу на запремину што је био

одлучујући фактор у избору облика хранитеља. Модул хранитеља (M_h) се узима да буде најмање за 20% већи од модула одливка (M_o) или дела одливка који храни.

$$M_h > 1.2 \cdot M_o \quad (4.23)$$

Модул цилиндричног хранитеља дат је релацијом 4.24 [103].

$$M_h = \frac{DH}{D+4H} \quad (4.24)$$

На основу вредности запремине и површине одливка, добијених анализом САД модела ($V_c=3661113.8mm^3$ и $A_c=253716.66mm^2$), модул одливка је: $M_o = 14.43$. Како су хранитељи постављени симетрично да сваки храни половину одливка, релација 4.25. даје коначан израз функције циља која се минимизира.

$$F = M_h - 1.2 \cdot \frac{M_o}{2} = \frac{DH}{D+4H} - 8.66 > 0 \quad (4.25)$$

4.6.2. Дефинисање ограничења

Дефинисање одговарајућих ограничења оптимизационог процеса започето је интерпретацијом трећег *Cambell*–овог правила за храњење одливка, према коме испуњење другог правила на коме је заснована функција циља не гарантује сасвим надокнаду дефицита метала, насталу скупљањем током очвршћавања. Наиме, поред тога што хранитељ мора да нахрани одливак, он мора и сам себе да нахрани јер је процес очвршћавања готово истовремен. Ефикасност хранитеља (ε) дефинисана је као однос метала потребног за исхрану одливка али и хранитеља ($V_f + V_c$) и запремине хранитеља (V_f).

$$\varepsilon = \frac{\alpha(V_f + V_c)}{V_f} \quad (4.26)$$

Где је: α – коефицијент скупљања током очвршћавања, који за челик износи: $\alpha = 4\%$. Према *Cambell*–у ефикасност нормалног цилиндричног хранитеља износи $\varepsilon = 14\%$. Како је запремина одливка позната вредност ($V_c=3661113.8mm^3$), то је коначан израз ограничења представљен релацијом 4.27.

$$V_f \geq \frac{\alpha \frac{V_c}{2}}{\varepsilon - \alpha} \geq 0.4 \frac{V_c}{2} \Rightarrow \frac{D^2 H}{4} \pi \geq 0.2 V_c \quad (4.27)$$

Друго ограничење дефинисано је геометријом одливка и већ дизајнираним уливним системом, где је на основу оптимизоване висине ливења постављена горња граница

висине хранитеља, а на основу горње површине одливка постављена је горња граница пречника два хранитеља. У табели 4.3. дат је домен претраге вредности величина које су предмет оптимизације.

Табела 4.3. Домен претраге оптималних вредности

	D (mm)	H (mm)
Доња граница	10	10
Горња граница	150	80

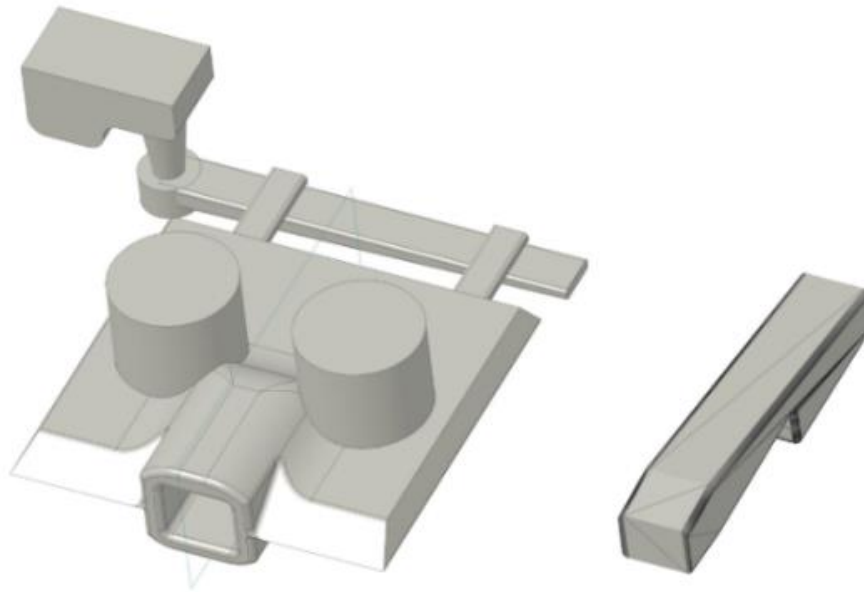
4.6.3. Оптимизациони процеси и њихова решења

Дефинисањем функције циља и простора претраге специфицираним постављеним ограничењима, испуњени су основни предуслови за спровођење оптимизационог процеса димензионих карактеристика предложених хранитеља. Прва примењена оптимизациона техника из породице природом инспирисаних метахеуристичких алгоритама, је генетски алгоритам. Величина популације, генетског алгоритма је 100 јединки, а максималан број генерација је 100. Алгоритам коришћен у селекцији је стохастичко универзално узорковање. Популација се посматра као да је мапирана на рулет – точак, већи делови точка припадају оним стринговима који имају мањи *fitness* (јер се ради о минимизационом проблему). На рулет се равномерно поставља N показивача, где је N број јединки у популацији. Једним окретањем рулета формира се популација. Као оператор укрштања коришћено је униформно укрштање. “*Crossover fraction*“ дефинише део нове популације који је настао укрштањем (без елитних јединки), и његова вредност се креће између 0 и 1. Број елитних јединки које се преносе у нову генерацију је 2. Генетски алгоритам зауставља свој рад у осмој генерацији јер су прекршена задата ограничења, а добијене оптимизоване вредности су следеће: $D=108mm$ и $H=80mm$.

Када је у питању оптимизација ројем честица *PSO*, величина популације, максималан број генерација, као и границе величина чије вредности се претражују, је као и код ГА. Вредности одговарајућих параметара су: $C1=1.35$ (коэффициент когнитивног учења (утицај искуства честице)), $C2=0.3$ (коэффициент социјалног учења (утицај искуства роја)), $W=0.65$ (параметар инерције који контролише утицај претходних брзина честице на тренутну). Оптимизација ројем честица – *PSO*, дала је следеће резултате: $D=106.98mm$ и $H=81.23mm$.

Дакле, као и у случају примене коришћених техника у оптимизацији уливног система, и у овом случају приметна је ефикасност обе примењене технике. Функција циља је релативно једноставног облика, без локалних екстремних вредности, што генерално олакшава оптимизациони процес прецизно дефинисаног простора претраге.

На бази резултата спроведених оптимизационих процеса којима је дефинисан систем храњења одливка, уз већ дефинисану геометрију уливног система, димензионо и геометријски је формиран целокупан систем ливења носача зуба багера у песку. Према добијеним резултатима прецизно су креирани *CAD* модели свих елемената система ливења понаособ, као и целокупан склоп система ливења, што представља улаз у наредно подпоглавље, тј. нумеричку симулацију која има улогу верификатора ваљаности пројектовања и оптимизације система ливења. На слици 4.22 дат је приказ коначног изгледа система ливења и језгра димензионисани према димензији одливка.

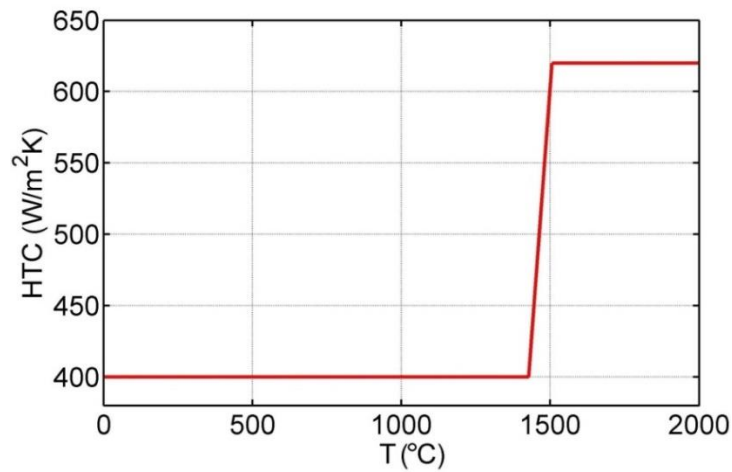


Слика 4.22. *CAD* модели система ливења са хранитељима и језгра

4.7. НУМЕРИЧКА СИМУЛАЦИЈА ПРОЦЕСА ЛИВЕЊА

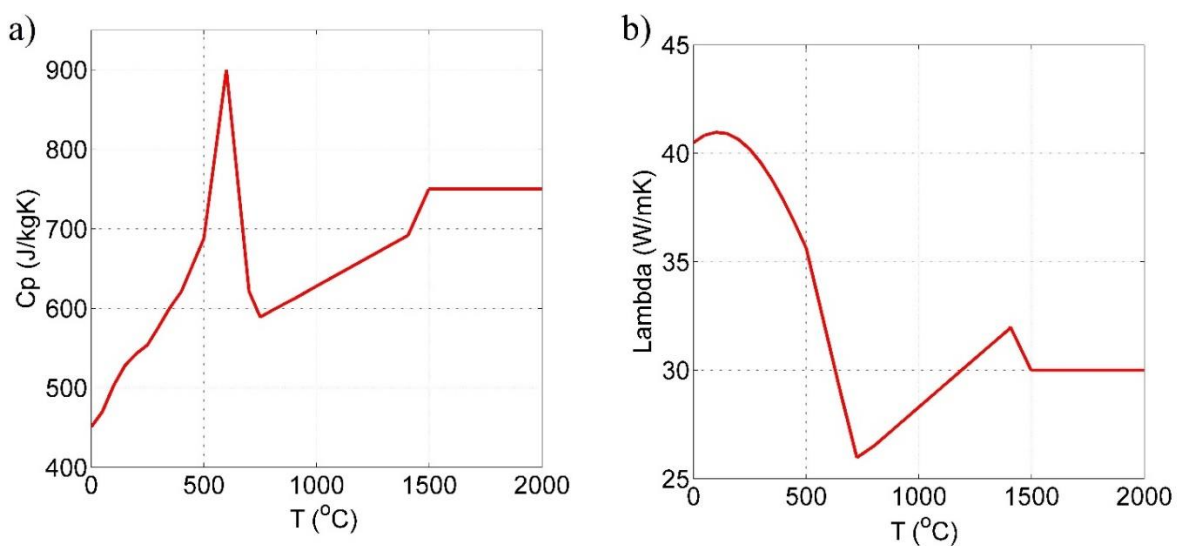
Нумеричком симулацијом процеса верификована је ваљаност оптимизованог дизајна система ливења носача зуба багера. У наставку је изложена методологија спроведене нумеричке симулације. Наиме, као што је већ наглашено у уводном делу доктората, заједно са практичним знањем из ливница, програми за симулацију користе се да би се процес ливења боље разумео и лакше управљало њиме. Најважнији циљеви примене симулације су смањење трошкова и поуздана производња захтеваног квалитета. Цео процес од пуњења течног метала у калуп до очвршћавања и исхране доступан је као добар приказ физичког модела. „Хладно ливење” на рачунару омогућава да се побољша процес корак по корак. Лако се врши промена геометрије ливења (одливак, положај хранитеља, језгара, итд) и параметара процеса ливења (температура лива, брзина пуњења, итд). На основу дефинисане геометрије система ливења, приказују се информације о класама материјала и њиховом улогом у систему ливења као што су назив материјала, ИД број, ознака материјала, почетне температуре, запремина, густина, маса и др. У конкретном случају коришћен је модерна софтверски пакет *MAGMA*⁵ за симулацију процеса ливења у песку. *CAD* модели одливка, елемената уливног система и хранитеља коришћени су у *STL* формату. Како се у овом случају изводи симулација ливења легуре која се не налази у бази података софтвера потребно је податке о новој легури унети у базу података. Из базе података изабере се материјал који је по хемијском саставу и особинама сличан ономе који желимо да лијемо. Изабраном материјалу промени се име и запамти се у корисничком делу базе података. Сада је могуће унети нову композицију хемијских елемената и нове особине за материјал који се лије. Особине новог материјала остају у бази података. Хемијским саставом легуре утиче се на ливкост и понашање током процеса ливења, као и на особине готовог одливка. У наставку је описана симулација ливења челика хемијског састава: 0.5% *C*, 1.4% *Mn*, 0.035% *P*, 0.035% *S*, 0.4% *Si*, 0.1% *V*. У односу на стандардни садржај хемијских елемената за челик ознаке *GS30Mn5*, промењен је садржај угљеника, мангана и ванадијума. Почетна температура лива је 1600°C, температура калупа 40°C, а почетна температура језгра 20°C. Основни гранични услови при ливењу су: ликвидус температура 1498°C, солидус температура 1406°C, критеријум температуре 1 1415.2°C, критеријум температуре 2 1500°C, латентна топлота 254 kJ/kg, ефективност храњења 14%, коефицијент површинског напона 1.496 N/m. Након дефинисања група и врста материјала у систему ливења неопходно је одредити и коефицијенте прелаза топлоте – *HTC* за парове материјала који су у контакту. Код ливења у песку врши се премазивање површина калупа и језгра одговарајућим премазима у циљу

утицања на термичко понашање калуца и језгра у процесу ливења. У бази података налазе се *HTC* коефицијенти за различите парове материјала.



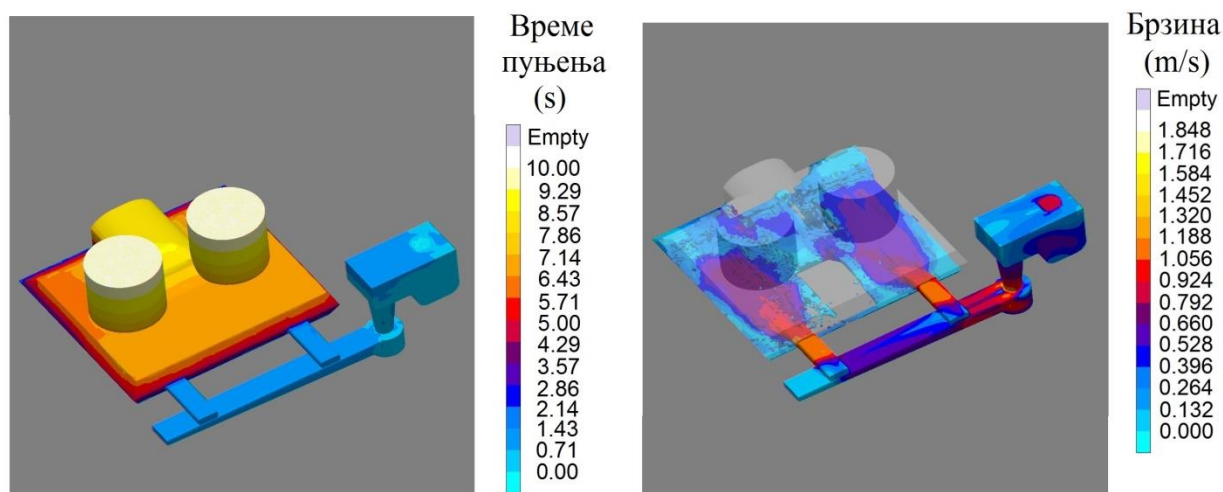
Слика 4.23. Коефицијент прелаза топлоте за пар челик - слој премаза

Слика 4.23. приказује *HTC* за пар нисколегирани челик и калуп, премазан слојем одређене дебљине. Остали *HTC* коефицијенти примењени у симулацији коришћени су из базе података софтвера (песак – језгро коришћен је константан $HTC=800 \text{ W/m}^2\text{K}$, за парове хранитељ – песак и уливник – песак коришћен је температурно зависан коефицијент челик – песак, и за пар песак – језгро коришћен је константан *HTC* у износу од $800 \text{ W/m}^2\text{K}$). Сваки *HTC* могуће је модификовати према конкретним условима у погону, тиме се узима у обзир додатна топлотна проводљивост. Специфични топлотни капацитет (*Cp*) и топлотна проводљивост '*Lambda*', дати су графичким приказом у функцији од температуре на слици 4.24.



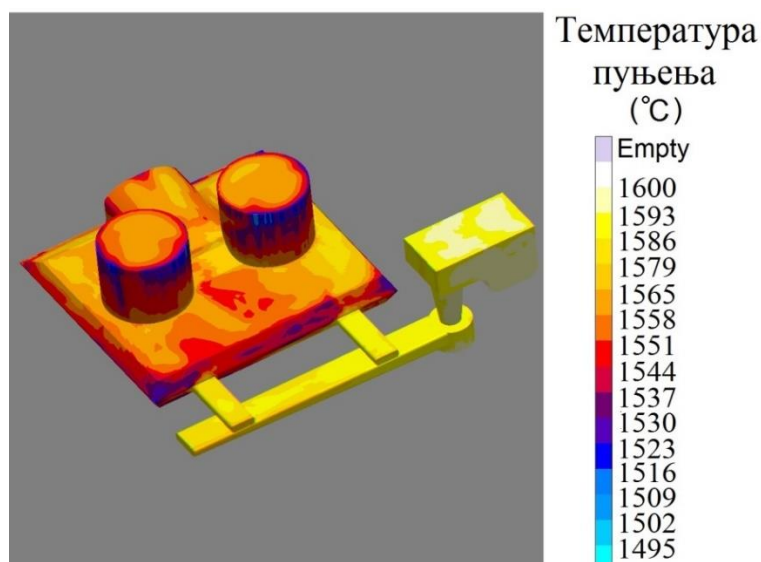
Слика 4.24. Карактеристике материјала а) специфични топлотни капацитет и б) топлотна проводљивост

Правилно дефинисана мрежа геометрије је основа сваке симулације и игра виталну улогу у тачности резултата симулације. Финоћа и густина мреже доводи до тачнијих резултата али захтева дуже време потребно за извођење симулације. Укупан број коначних запремина је један милион, од тога је број елемената запремине који се односе на метал 157611, без присуства критичних елемената. Потребан услов да би симулација одговарала физичком процесу у стварности је да се између два суседна зида налазе бар 3 елемента мрежне запремине. У овом случају број запремина између два суседна зида по осама X/Y/Z је респективно 154/130/49. Резултати симулације дају важне и суштинске информације о квалитету и коректности система ливења. Анализа резултата симулације започета је од критеријума *FSTIME* (који даје информацију о времену пуњења калупа), јер је предмет оптимизације управо било време пуњења калупа. Укупно време пуњења калупа (одливак, уливни систем и хранитељи) износи око 10s, па је резултат оптимизованог времена пуњења запремине одливка сагласан са резултатом симулације. Следећи критеријум је брзина. Опција *VELOCITY* даје информацију о распореду брзина у току процеса ливења. На слици 4.25. се види да се брзина мења равномерно у зависности од величине пресека елемената уливног система.



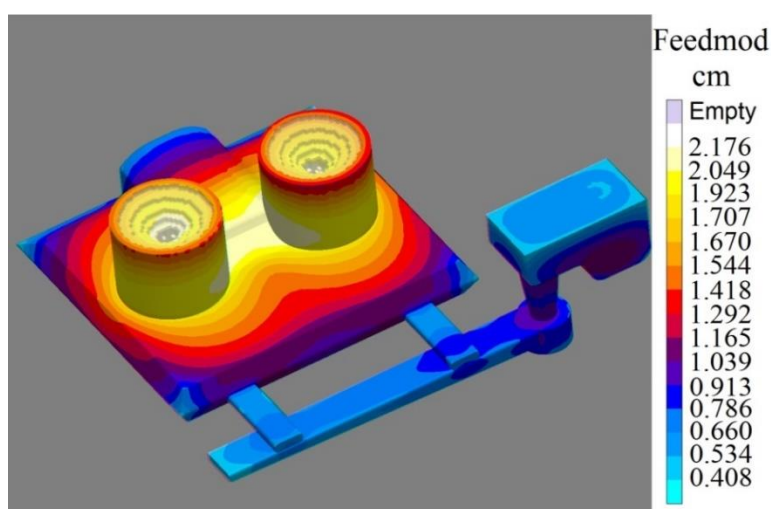
Слика 4.25. Време пуњења калупа и брзина ливења

FILLING TEMPERATURE (Слика 4.26) резултат приказује распоред температура у калупној шупљини, на овај начин сав период пуњења је обједињен је у једном резултату. Тиме је омогућено праћење распореда температура по читавој запремини одливка. Комплетан период пуњења сведен је на један резултат. Приказане вредности су засноване на почетној температури пуњења (1600°C).



Слика 4.26. Температурно поље на крају пуњења

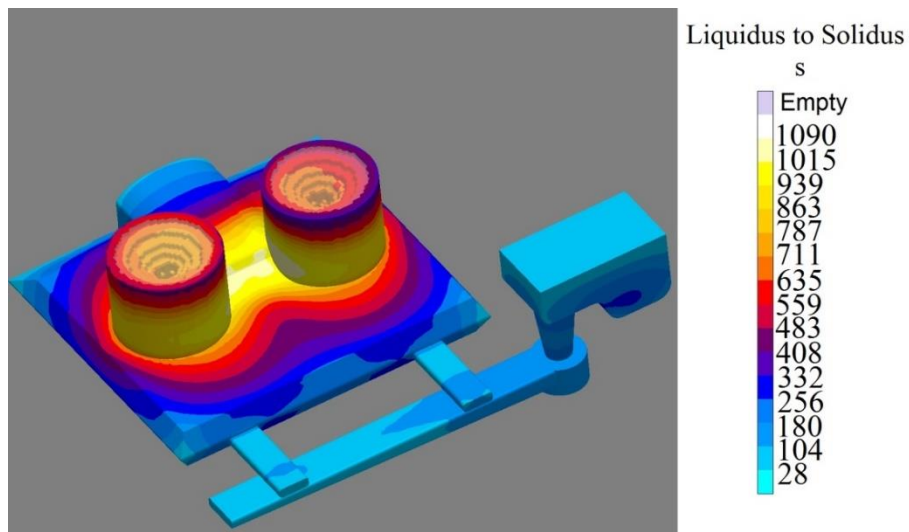
За дефинисање очвршћавања односно процеса хлађења одливка, морају се унети потребни параметри и гранични услови. Као прво мора се специфицирати време или температура на којој се симулација очвршћавања завршава. У конкретном случају температура завршетка симулације је 200°C. Наредни критеријуми служе бољем разумевању термичких услова у оквиру ливења и при избору одговарајућих хранитеља. *FEEDMOD* критеријум (Слика 4.27) је посебно дизајниран за процесе ливења у песку. Циљ је да промена вредности "*FEEDMOD*" буде таква да се оствари усмерено очвршћавање према хранитељима. Највеће вредности треба да се појаве у хранитељу и постепено постају све мање у одливку. Вредности термичког модула потврђују исправност предложених хранитеља, који су дизајнирани на основу прорачуна геометријског модула.



Слика 4.27. *FEEDMOD* критеријум

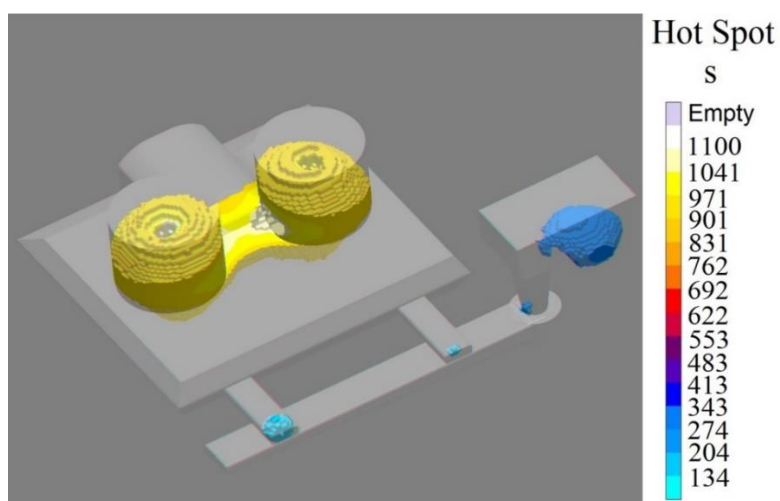
LIQUIDUS TO SOLIDUS критеријум показује време, које је потребно да протекне, да запремина материјала пређе из течног у чврсто стање. Он нам помаже да откријемо

области у одливку које очвршћавају касније, посебно оне запремине које очвршћавају након времена до када је могућа њихова исхрана (изоловане запремине). Слика 4.28. потврђује исправност дизајнираног уливног система и хранитеља по овом критеријуму, јер је период ошвршћавања највећи у области хранитеља.



Слика 4.28. Време протекло од ликвидус до солидус температуре

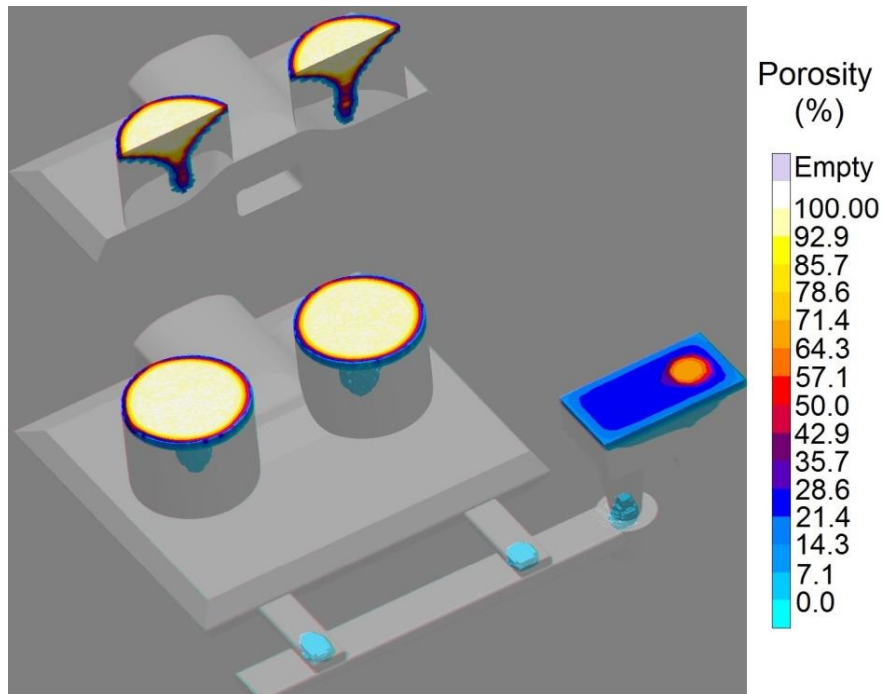
HOT SPOT резултат показује запремине метала које последње очвршћавају. Помаже да се идентификују места где се заостали течни метал налази и показује да ли је могуће макроскопско храњење те запремине из хранитеља. Према слици 4.29. постоји запремина која очвршћава у хранитељу, што је предуслов за "здрав" одливак. *HOT SPOT FSTIME* показује, преко времена очвршћавања, запремине у одливку које имају знатно дужи интервал очвршћавања. Области дефинисане овим критеријумима још су уже него области одређене резултатом *HOT SPOT*.



Слика 4.29. Критеријум *HOT SPOT*

TOTAL POROSITY резултат показује збирно порозност и микропорозност у једном резултату. То значи да су показане максималне вредности порозности и микро

порозности. На слици 4.30. приказана је, кроз рендгенски поглед, и укупна порозност у одливку и порозност кроз средину хранитеља. Јединица мере за укупну порозност је (%). На основу рендгенског погледа у одливак, закључује се да технологија ливења легуре обезбеђује захтевани квалитет.



Слика 4.30. Критеријум *POROSITY*

Дакле, оптимизовано решење система ливења у потпуности је задовољило квалитативне захтеве, а томе у прилог говоре резултати нумеричке симулације по свим критеријумима. Предложени систем ливења носача зуба багера је реализован у индустријским условима, а затим је одливени део, носач зуба багера, инсталиран на кашику багера и у условима експлоатације се показао веома успешно, као и целокупно модуларно решење кашике багера.



Слика 4.31. Носач зуба, монтажа, кашика багера

Глава 5.

ИНТЕЛИГЕНТНО УПРАВЉАЊЕ ПРОЦЕСОМ ЛИВЕЊА

За разлику од неких других индустријских процеса, многе ливнице нису имале користи од напредне аутоматизације, те се процес пуњења калуца још увек одвија ручно. На слици 5.1. дат је приказ из две ливнице у Србији, где се процес ливења, од транспорта до пуњења калуца, одвија ручно.

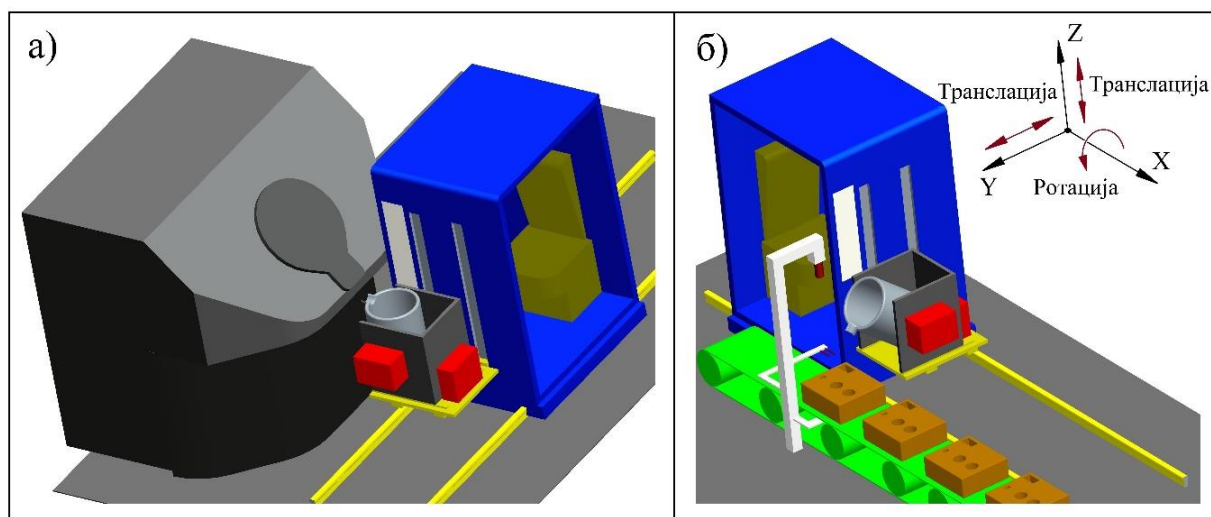


Слика 5.1. Ручно управљање производним процесом гравитационог ливења

Циљ овог поглавља доктората је да представи предлог аутоматизованог система у ливници, затим да представи експериментално лабораторијско постројење за симулацију процеса ливења, као и управљање симулацијом процеса ливења, засновано на фази и неуро фази системима.

5.1. ПРЕДЛОГ АУТОМАТИЗОВАНОГ СИСТЕМА

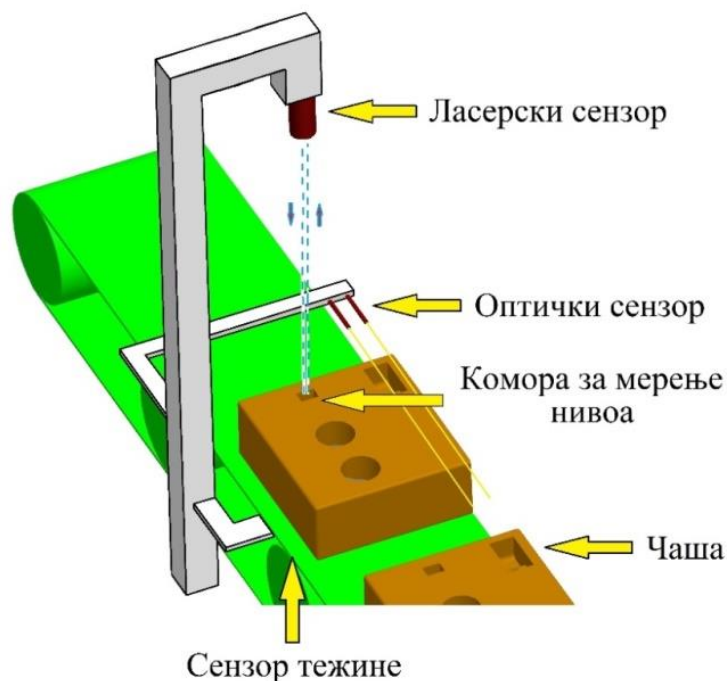
У циљу аутоматизације процеса ливења предложен је систем који аутоматизује процес сипања истопљеног метала из индукционе пећи у ливачки лонац, транспорт, као и пуњење калупа (Слика 5.2).



Слика 5.2. Предложени аутоматизовани систем у погону: а) сипање истопљеног метала у лонац из пећи и б) прецизно сипање истопљеног метала у калуп

Аутоматизовани систем обухвата возило које се креће по шинама у погону и омогућује транспорт ливачког лонца од пећи до линије са калупима. Ливачки лонац се позиционира до индукционе пећи где се транслаторним кретањима (дуж X , Y и Z осе) обезбеђује пуњење лонца истопљеним металом. Затим следи трансфер до транспортне траке са калупима, где ливачки лонац са три степена слободе пуни калуп уз помоћ сензорске технике, инсталиране на месту ливења. Поред побољшања услова рада за производне раднике, циљ аутоматизованог система је прецизно пуњење калупа. Појам прецизно пуњење калупа дефинисан је са три кључне тачке током процеса. Прва је прецизно падање млаза у уливну чашу, друга је одржавање константног нивоа истопљеног метала у чаши. Најзад, трећа је елиминисање преливања истопљеног метала из калупа. Систем који испуњава захтеве дефинисане наведеним тачкама, може се сматрати поузданим за реализацију процеса ливења. За испуњење захтева дефинисаних наведеним тачкама предвиђена је следећа сензорска техника: два оптичка сензора, ласерски сензор и сензор тежине. Пар оптичких сензора има функцију граничних прекидача јер формира зону предвиђену за пад млаза. Наиме, када млаз пресече сноп сензора активира се транслација лонца по Y осе како би се млаз увео у зону између сензора. Смер транслације зависи од оптичког сензора који је активиран. Ласерски сензор користи се у сврху одржавања нивоа истопљеног метала у уливној чаши. Одржавање нивоа истопљеног метала у уливној чаши

обезбеђује брзо и ламинарно пуњење калупа, затим елиминише уношење нечистоћа у калуп, које индукују дефекте у одливку. За употребу овог сензора потребно је калуп дизајнирати тако да има посебну комору за мерење нивоа која је спојена са уливном чашом (Слика 5.3).



Слика 5.3. Сензорска техника на линији за ливење и приказ калупа

Ласерски сензор шаље информације о нивоу истопљеног метала у чаши на основу чега се управља брзином закретања ливачког лонца. Коначно, испуњење трећег захтева прецизног ливења, омогућује сензор тежине који прекида процес ливења када се достигне жељена маса попуњеног калупа истопљеним металом. Једноставном анализом *CAD* модела одливка (са уливним системом и хранитељима) добија се његова запремина на основу које се, уз познавање густине истопљеног метала, специфицира жељена маса. Сензор за мерење масе уграђен је испод транспортне траке. Након постављања новог калупа, на место пуњења, процес се понавља. Следи наставак закретања лонца и прецизне translације из позиције у којој је заустављен, до новог заустављања од стране сензора за мерење масе.

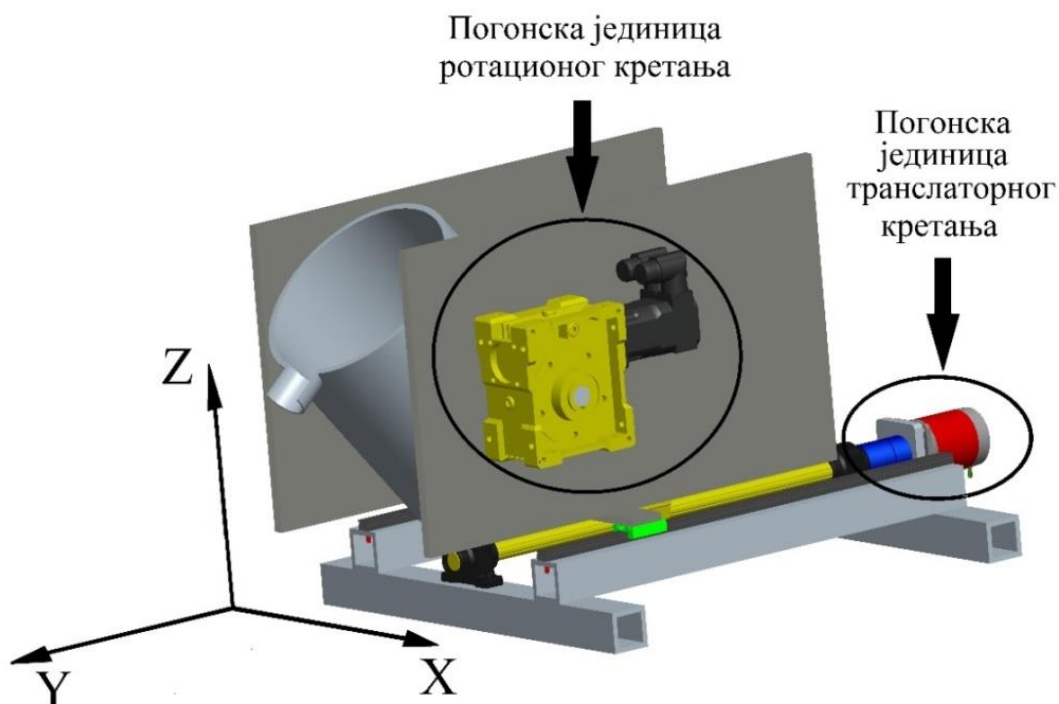
5.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ЛАБОРАТОРИЈСКО ПОСТРОЈЕЊЕ

На бази предложеног решења аутоматизованог погона у ливници, развијено је експериментално лабораторијско постројење, које садржи: симулатор ливења са два степена слободе, симулациони модел калупа, сензорску технику и управљачке

компоненте. Сви наведени сегменти експерименталне поставке биће у наставку детаљно описани.

5.2.1. Симулатор ливења

Лабораторијски симулатор, који је функцијски еквивалентан делу предложеног аутоматизованог система из подпоглавља 5.1., обухвата транслаторно кретање ливачког лонца по Y оси, као и ротационо кретање ливачког лонца око X осе.



Слика 5.4. CAD модел лабораторијског симулатора ливења

Ротационо кретање изводи ливачки лонац и самим тим омогућује симулацију сипања истопљеног метала у калуп. Саставни делови симулатора који обезбеђују закретање ливачког лонца су: носећа конструкција (Џ.0361), два куглична лежаја (произвођач: *SKF*, тип: 6004), пужни редуктор (произвођач: *Chiaravalli group SpA*, тип: *CHM301056B14*), АС серво мотор (произвођач: *Schneider Electric*, тип: *BSH055*). Укупна маса целог система је $m=35kg$. На слици 5.5 приказане су компоненте погонске јединице за ротационо кретање, АС серво мотор и редуктор.



Слика 5.5. Компоненте погонске јединице за ротационо кретање (AC серво мотор и редуктор)

Пужни редуктор, ознаке *СНМ301056В14* произвођача *Chiaravalli group SpA*, као зупчasti пар код кога се осе зупчаника секу под углом од 90° , у конкретном случају вредност преносног односа је $i = 10$. Друге његове техничке карактеристике су дате у табели 5.1. а димензионе на слици 5.6.

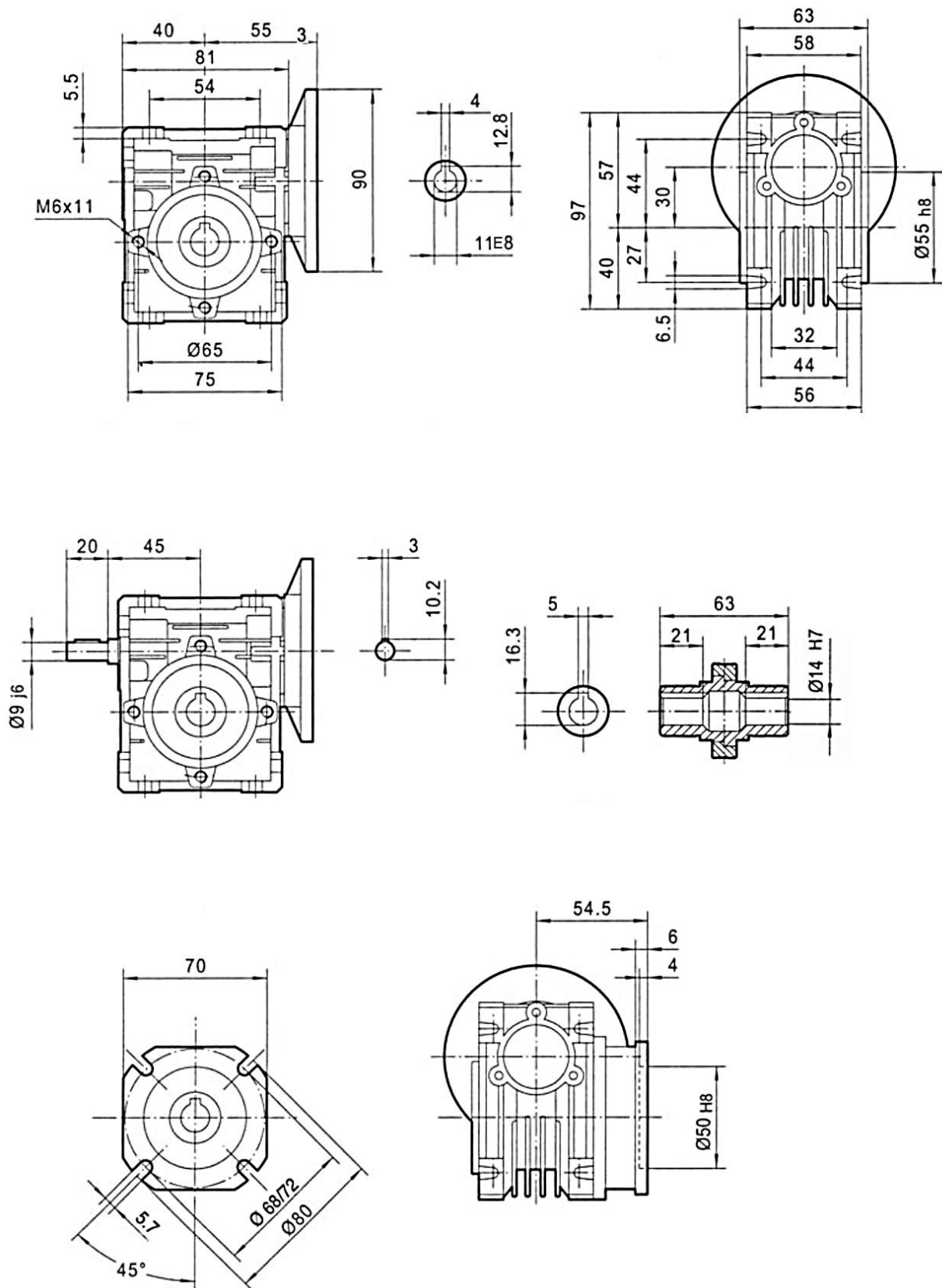
Табела 5.1. Техничке карактеристике пужног редуктора *СНМ301056В14*

Тип пужног редуктора	/	СНМ 030
Преносни однос	/	10
Максимални број обртаја	[o/min]	140
Максимална снага	[kW]	0,22
Момент	[Nm]	11
Повезивање мотора	/	63/56
		В5/В14

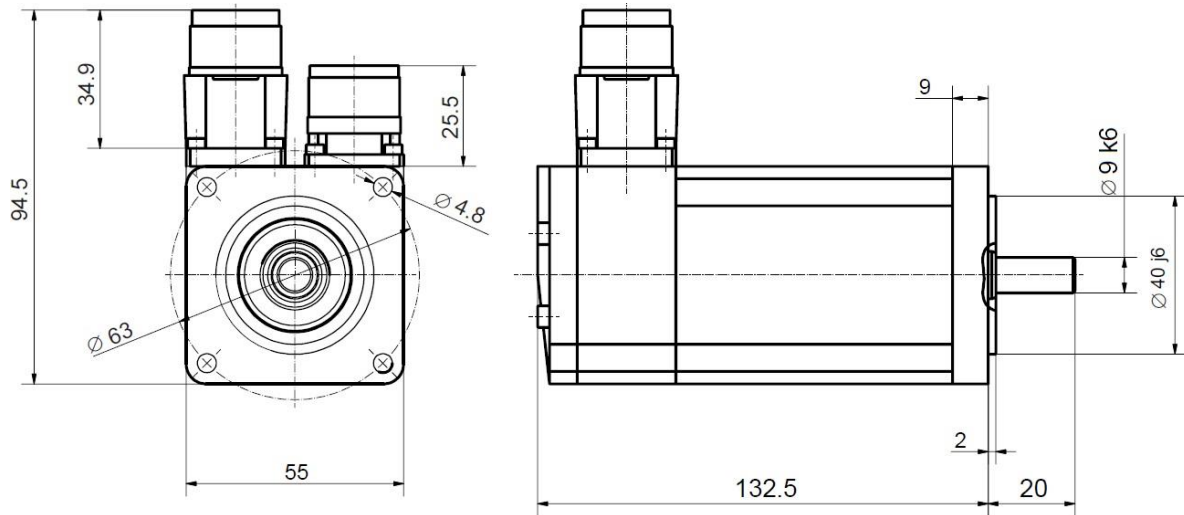
AC серво мотор *BSH055* састоји се од: кућишта, фланше за причвршћивање мотора, осовине, конектора за енергетски кабал и конектора за кабал енкодера. Његове техничке карактеристике дате су у табели 5.2., а на слици 5.7. дате су његове димензионе карактеристике.

Табела 5.2. Техничке карактеристике AC серво мотора *BSH0551Т11А2А*

Ознака	/	<i>BSH0551Т11А2А</i>
Тип	/	трофазни
Називни напон	[V]	480
Називни момент	[Nm]	0,45
Називна снага	[kW]	0,402
Отпорност намотаја статора	[Ω]	12,2
Индуктивност намотаја статора	[mH]	20,8
Инерција (без кочнице)	[kgcm ²]	0,059
Инерција (са кочницом)	[kgcm ²]	0,0803
Називна брзина обртања	[min ⁻¹]	8000
Интегрисани енкодер	/	<i>SinCos</i> (резулација: 131072 импулс/обртаја)



Слика 5.6. Димензионе карактеристике пужног редуктора СМ301056В14



Слика 5.7. Димензионе карактеристике АС серво мотора BSH055

Провера ваљаности избора АС серво мотора врши се на основу обртног момента на осовини електромотора, а који је дефинисан динамичким (T_d) и статичким моментом (T_s).

$$T = T_d + T_s \quad (5.1)$$

Маса пуног лонца је приближно 13kg , оса обртања постављена је кроз тежиште укупне масе. У току сипања укупна маса се смањује, а одступање позиције тежишта од осе обртања није веће од $l = 15\text{mm}$, тако да је максималан статички момент $T_s = mgl = 1.9\text{Nm}$ на осовини закретања лонца. Максимални статички момент на осовини мотора је:

$$T_s = \frac{T_s}{i} = 0.19\text{Nm} \quad (5.2)$$

Динамички момент зависи од укупног момента инерције покретних маса (J_{uk}) у систему преноса и угаоног убрзања осовине мотора ($\dot{\omega}$):

$$T_d = J_{uk} \cdot \dot{\omega} \quad (5.3)$$

$$J_{uk} = \frac{J_1}{i^2} + J_2; \quad J_1 = J_{лонца} + 2J_{лежаја} + J_{зупчаника}; \quad J_2 = J_{пужа} + J_{мотора} \quad (5.4)$$

$$J_{лонца} = \frac{1}{12} m(3r^2 + h^2) = 0.12\text{kgm}^2 \quad (5.5)$$

$$J_{лежаја} = \frac{1}{2} mr^2 = 0.000015\text{kgm}^2 \quad (5.6)$$

$$J_{зупчаника} = \frac{1}{2} mr^2 = 0.000396\text{kgm}^2 \quad (5.7)$$

$$J_{пужа} = \frac{1}{2} mr^2 = 0.0000175\text{kgm}^2 \quad (5.8)$$

$$J_{мотора} = 0.000059\text{kgm}^2 \quad (5.9)$$

На основу израчунатих момената инерције покретних маса добијен је укупни момент инерције $J_{uk} = 0.0012 \text{kgm}^2$.

Дефинисањем максималног броја обртаја и времена убрзања, добија се угаоно убрзање. Због природе процеса већи број обртаја осовине лонца од $n = 30 \text{o/min}$ није потребан, време убрзања је $t = 0.2 \text{s}$, па је:

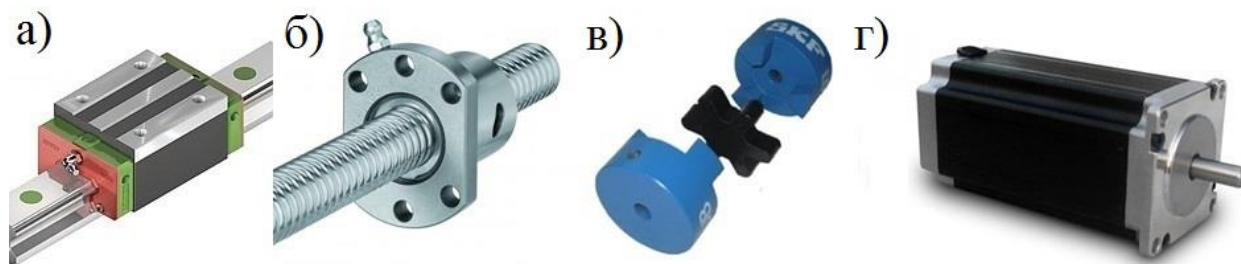
$$\dot{\omega} = \frac{2\pi n}{60t} = 157 \text{rad/s}^2 \quad (5.10)$$

На основу укупног момента инерције покретних маса и угаоног убрзања, пројектованих на вратило мотора, динамички момент износи:

$$T_d = J_{uk} \cdot \dot{\omega} = 0.18 \text{Nm} \quad (5.11)$$

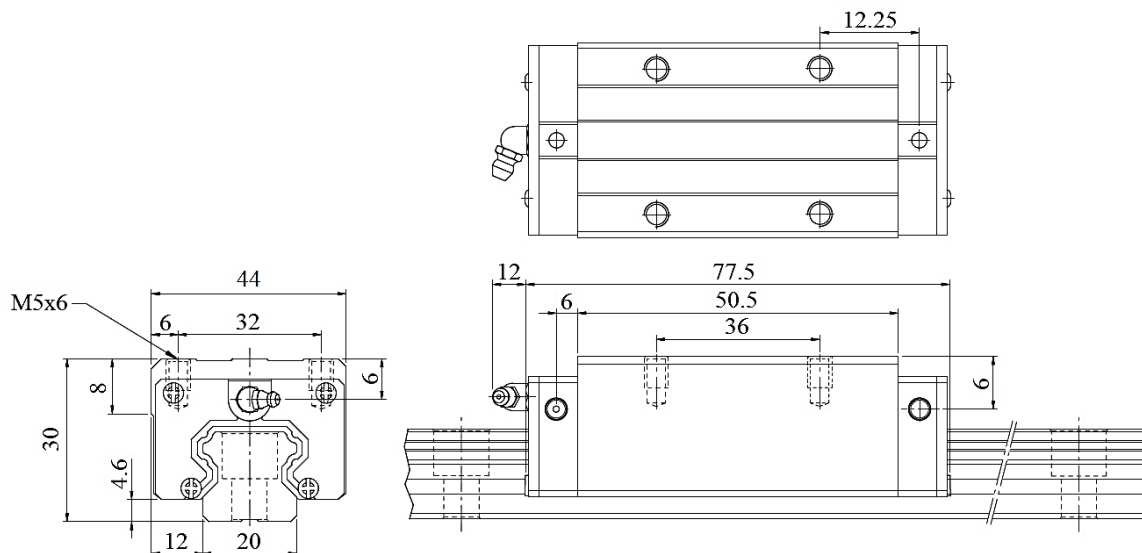
Укупан момент на осовини АС серво мотора је $T = T_s + T_d = 0.37 \text{Nm}$, што је мање од номиналне вредности момента серво мотора *BSH0551T11A2A*, која износи $T_{BSH055} = 0.45 \text{Nm}$. Овим рачуном потврђена је исправност избора предложеног АС серво мотора, који заједно са предложеним редуктором, представља задовољавајућу погонску јединицу.

Транслаторно кретање по *Y* оси изводи механизам из претходног одељка који носи ливачки лонац. Значај овог кретања огледа се у постизању веће прецизности симулације сипања истопљеног метала. Саставни делови симулатора који обезбеђују транслаторно кретање по *Y* оси су: носећа конструкција (Ћ.0361), пар профилисаних вођица са колицима (произвођач: *HIWIN – Motion Control & Systems*, тип: *HGH20CA*), навојно вретено са навртком (произвођач: *HIWIN – Motion Control & Systems*, тип: *R16x16*), кућиште за навртку (произвођач: *HIWIN – Motion Control & Systems*, тип: *GDF-16*), пар лежајева са кућиштима (произвођач: *HIWIN – Motion Control & Systems*, тип: *LKBA16*), корачни мотор (произвођач: *MotionTECH*, тип: *SB57B003*). Носећа конструкција израђена је од челичних кутијастих профила (Ћ.0361), и њена маса је $m_{nk} = 49 \text{kg}$.



Слика 5.8. Компоненте линеарног кретања по *Y* оси: а) вођица са колицима, б) навојно вретено, в) спојница и г) корачни мотор

Систем за вођење, при кретању покретног модула у односу на непокретни, представља пар профилисаних котрљајних вођица са колицима типа *HGH20CA*, произвођача *HIWIN – Motion Control & Systems*. Дужина шине је $l = 500\text{mm}$, маса шине је $m_{\xi} = 1.15\text{kg}$, а маса колица је $m_k = 0.38\text{kg}$. У табели 5.3. дате су механичке карактеристике вођица са колицима типа *HGH20CA*, а на слици 5.9. њене димензионе карактеристике. *HGH* серија овог произвођача намењена је за обрадне центре, глодалице, бушилице, стругове, па су и њене карактеристике наведене у табели 5.3. у складу са захтевима намене. Како је укупна маса покретног модула *Y* осе $m_{pmY} \approx 41\text{kg}$ (случај пуног лонца), а самим тим и оптерећење $Q \approx 402\text{N}$, за предложени систем вођења минорно, у рачунску анализу вођица неће се улазити. Детаљан опис рачунске анализе система вођења овог произвођача дат је на *web* страни произвођача [128].

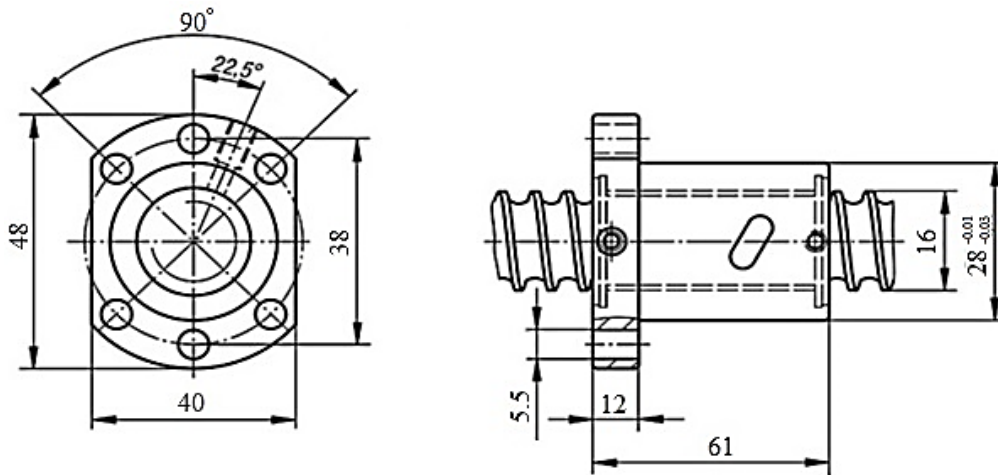


Слика 5.9. Димензионе карактеристике вођице са колицима *HGH20CA*

Табела 5.3. Механичке карактеристике *HGH20CA*

Динамичка носивост C_{dym} [N]	Статичка носивост C_{stat} [N]	Статички момент M_o [Nm]	Статички момент M_x [Nm]	Статички момент M_y [Nm]
17750	37840	380	270	270

За претварање обртног кретања у праволинијско кретање предвиђен је систем навојно вретено – навртка са куглицама, ознаке *R16x16*. Дужина навојног вретена је $l = 600\text{mm}$, статичка носивост износи $C_{stat} = 19300\text{N}$, а динамичка $C_{dym} = 9100\text{N}$. Предвиђени начин уградње навојног вретена јесте тзв. двострано улежиштење код кога су лежајеви постављени на оба краја вретена. Њихов задатак је да, поред радијалног и аксијалног оптерећења, прихватају и момент савијања вретена. На слици 5.10. приказане су димензионе карактеристике навојног вретена са навртком.



Слика 5.10. Димензионе карактеристике навојног вретена са навртком $R16 \times 16$

Као што је већ истакнуто, маса покретног модула је $m \approx 35\text{kg}$ у случају празног ливачког лонца, међутим, у анализи транслаторног кретања биће узет случај пуног ливачког лонца, што је промена масе покретног модула на $m \approx 41\text{kg}$. Ход дуж Y осе износи $l_Y = 500\text{mm}$, потребна максимална брзина износи $V_{\max} = 50\text{mm/s}$, време убрзања/успорјења је $t = 1.25\text{s}$,

убрзање износи $a = \frac{V_{\max}}{t} = 0.04 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, док је коефицијент трења вођица $\mu = 0.004$. Сви

наведени елементи узети су у обзир при провери оптерећења вретена и навртке, које је дато у наставку.

Сила при убрзању: $F_{a1} = ma + \mu mg = 3.04\text{N}$.

Сила при униформном кретању: $F_{a2} = \mu mg = 1.4\text{N}$.

Сила при успоравању: $F_{a3} = \mu mg - ma = -1.64\text{N}$.

Максимална аксијална сила износи: $F_{\max} = F_{a1} = 3.04\text{N}$.

Коефицијент карактеристичан за двострано улежиштење износи: $\eta_2 = 20$.

Неослоњена дужина вретена је: $l = 550\text{mm}$.

Пречник вретена је: $d = 16\text{mm}$.

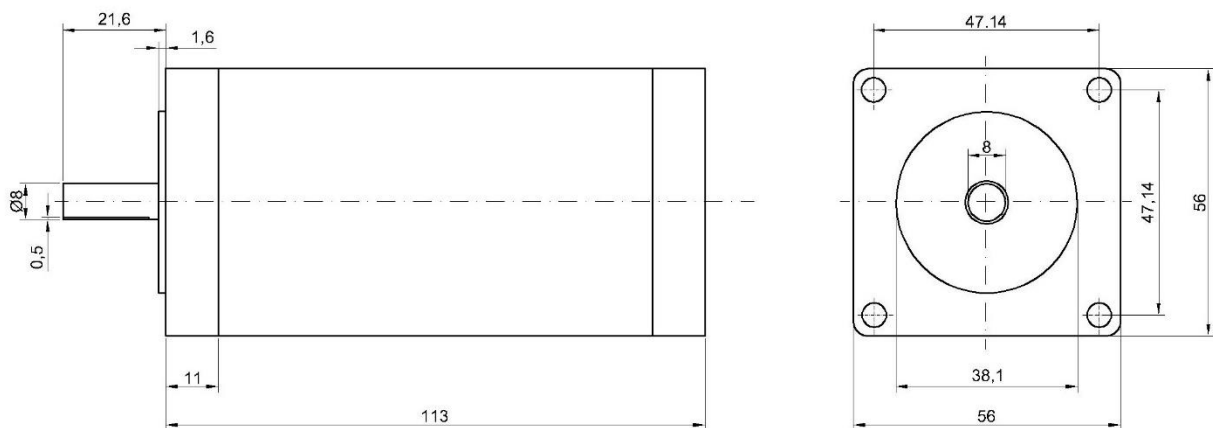
Оптерећење које доводи до извијања вретена: $P_1 = \eta_2 \frac{d^4}{l^2} 10^4 = 43329\text{N}$.

Дозвољена сила притиска: $P_2 = 116d^2 = 29629\text{N}$.

Дозвољено аксијално оптерећење навртке: $F_{\max.} = \frac{C_{stat.}}{f} = \frac{19300\text{N}}{5} = 3860\text{N}$, где је: $C_{stat.}$ –

статичко оптерећење навртке, f – степен сигурности који обухвата рад под утицајем вибрација и удара. Из представљеног рачуна се види да аксијална сила може бити далеко

већа од максималне израчунате $F_{\max} = F_{a1} = 3.04N$. Како је корак мотора $\theta_s = 1.8^\circ$, то је за један обртај потребно 200 импулса, да се пређе пут од 16mm. Максимална брзина позиционирања је $V_{\max} = 50mm/s$, па је за њено остварење потребан број обртаја вретена, односно мотора $N_{\max} = 3.125o/s$. Критичан број обртаја је $N_{\text{критично}} = \lambda_2 \frac{d}{l^2} 10^7 = 11583 o/\text{min}$, где је $\lambda_2 = 21.9$ где је коефицијент карактеристичан за двострано улежиштење. Пошто је $N_{\text{максимално}} < N_{\text{критично}}$ вретено задовољава критеријум дозвољеног броја обртаја. Као погон за транслаторно кретање предвиђен је корачни мотор типа *NEMA 23 - SB57B003*, произвођача *MotionTECH*. Димензионе карактеристике корачног мотора приказане су на слици 5.11. а његове техничке карактеристике дате су у табели 5.4.



Слика 5.11. Димензионе карактеристике корачног мотора *NEMA 23 - SB57B003*

Табела 5.4. Техничке карактеристике корачног мотора *NEMA 23 - SB57B003*

Угао по кораку	[°]	1,8
Називни напон	[V]	4,8
Називна струја	[A]	3
Дужина мотора	[mm]	113
Отпорност	[Ω]	2.1
Индуктивност	[mH]	9
Момент	[Nm]	2,5
Пречник вратила	[mm]	8
Инерција ротора	[kg/cm ²]	0.81
Тежина мотора	[kg]	1,55

Као и код серво мотора, провера корачног мотора врши се на основу обртног момента на његовој осовини, а који је дефинисан динамичким и статичким моментом (5.1). Статички момент (T_s) дат је следећом релацијом:

$$T_s = \frac{\mu m g r}{2\pi\eta} = \frac{0.004 \cdot 41 \cdot 9.81 \cdot 0.016}{2\pi \cdot 0.9} = 0.0039 Nm \quad (5.12)$$

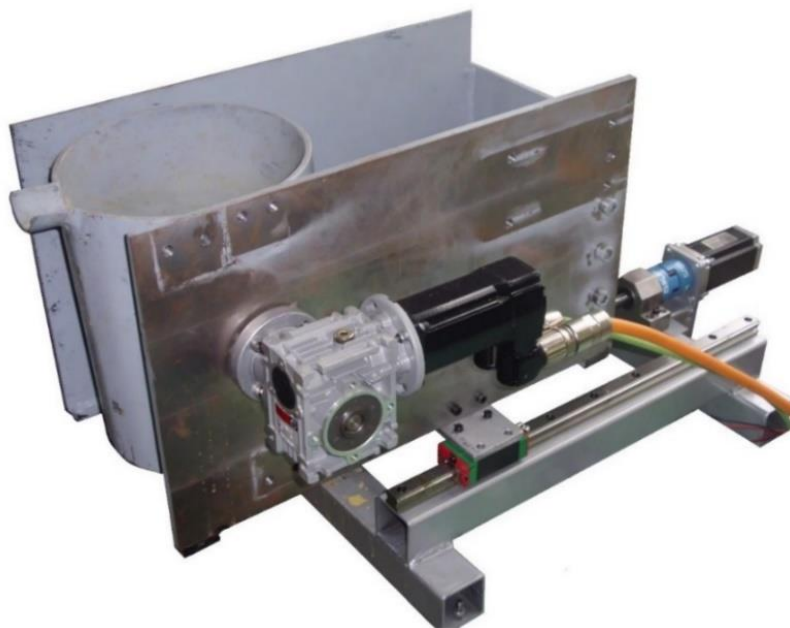
Где је η степен искоришћења система вретено – навртка. Динамички момент завистан је од момента инерције покретних маса у систему преноса и угаоног убрзања осовине мотора, и дат је у релацији (5.3). Моменти инерције покретних маса: $J_{\text{покретног_модула}} = 0.73 \text{kgm}^2$ (вредност добијена на основу анализе CAD модела покретног модула); $J_{\text{навојног_вретена}} = 0.000064 \text{Nm}$. Угаоно убрзање износи:

$$\dot{\omega} = \frac{N_{\text{max.}}}{t} = \frac{3.125}{1.25} = 2.50 / \text{s}^2 \quad (5.13)$$

Вредност динамичког момента износи:

$$T_d = (J_{\text{покретног_модула}} + J_{\text{навојног_вретена}}) \cdot \dot{\omega} = 1.8 \text{Nm} \quad (5.14)$$

Укупан момент на осовини корачног мотора је $T = T_s + T_d = 1.804 \text{Nm}$, што је мање од номиналне вредности момента корачног мотора SB57B003, која износи $T_{\text{SB57B003}} = 2.5 \text{Nm}$. Овим рачуном потврђена је исправност избора предложеног корачног мотора. Приказ развијеног лабораторијског симулатора процеса ливења дат је на слици 5.12.



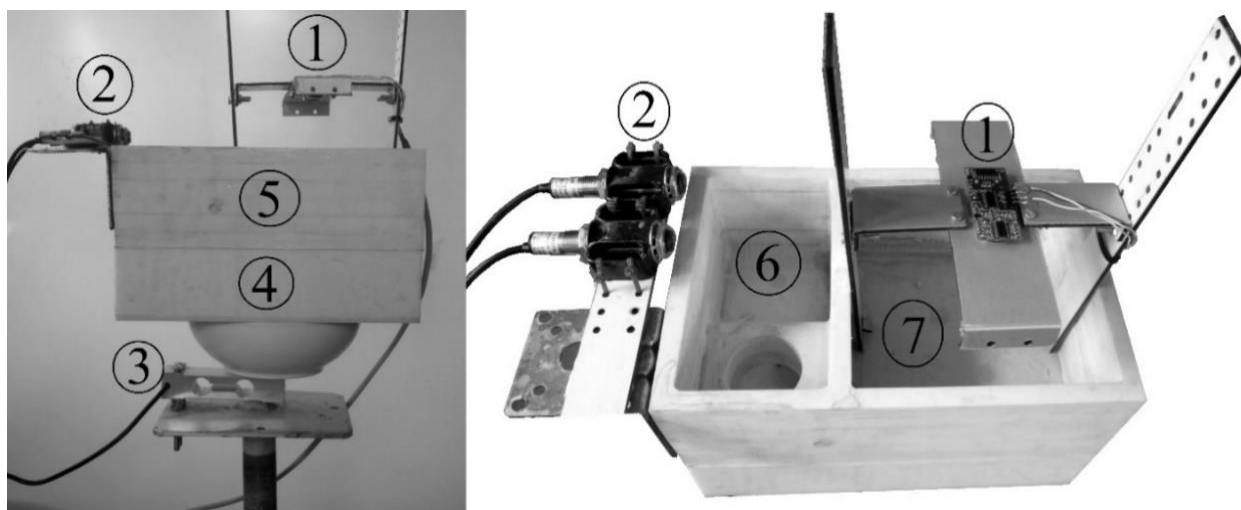
Слика 5.12. Лабораторијски симулатор процеса ливења

5.2.2. Симулациони модел калуца и сензорска техника

Симулациони модел калуца израђен је од вештачког мермера – кирока, и састоји се из два спојена суда. Први обухвата уливну чашу и комору за мерење нивоа, које су међусобно спојене. Други суд је запремина која се пуни. Сензорска техника садржи: ултразвучни сензор (као еквивалент ласерском сензору предложеном у подпоглављу 5.1)

за мерење нивоа, пар оптичких сензора за прецизно уливање у чашу, и, коначно, сензор за мерење тежине којим се спречава преливање из чаше. Приказ симулационог модела калуца и сензорске технике коришћене у експерименту, дат је на слици 5.13.

Дакле: 1 – ултразвучни сензор, 2 – оптички сензори, 3 – сензор за мерење тежине (опсега до 10kg), 4 – суд који представља запремину која се пуни, 5 – суд који садржи уливну чашу и комору за мерење нивоа, 6 – уливна чаша и 7 – комора за мерење нивоа. У експерименту је коришћена вода, обојена у боју која је најсличнија истопљеном металу. Воду је могуће користити у овој врсти истраживања, јер је Рејнолдсов број воде на собној температури готово исти као истопљеног метала на високој температури [61]. Однос Рејнолдсовог броја челика ($1560\text{--}1600^\circ\text{C}$) и Рејнолдсовог броја воде (20°C) је:

$$Re_{\text{челик}} = 0.93 \cdot Re_{\text{вода}}$$


Слика 5.13. Симулациони модел калуца и сензорска техника

За мерење нивоа предвиђен је ултразвучни сензор *Arduino HCSR04*, који омогућава безконтактно мерење раздаљине у опсегу од 20mm до 4000mm , уз прецизност мерења од око 3mm у оптималним условима.



Слика 5.14. Ултразвучни сензор *Arduino HCSR04*

Модул се састоји од ултразвучног предајника, ултразвучног пријемника и контролне електронике. Принцип рада је следећи:

- Модул се активира слањем контролног импулса дужине најмање $10\mu\text{s}$.
- Модул затим аутоматски шаље осам ултразвучних импулса фреквенције 40kHz .
- Када детектује повратне ултразвучне импулсе, генерише излазни сигнал чија је дужина пропорционална раздаљини.

На модулу постоје следећи пинови:

- Пин 1: *VCC* – напајање модула 5V .
- Пин 2: *Trig* – окидање/активирање мерења.
- Пин 3: *Echo* – повратни сигнал, дужина импулса пропорционална раздаљини.
- Пин 4: *GND* – земљење.

За прецизно уливање млаза у чашу предвиђен је пар оптичких сензор *G12-3A07PA*, произвођача *Q&W*, приказан на слици 5.15. а чије су техничке карактеристике дате у табели 5.5.

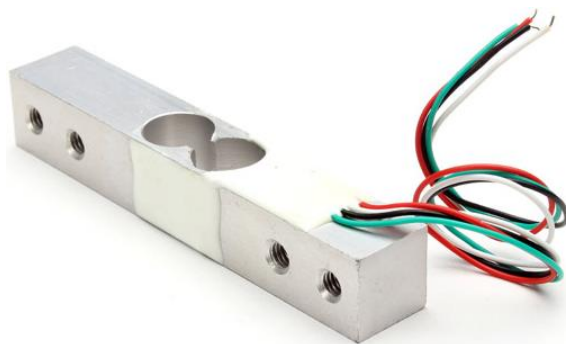


Слика 5.15. Оптички сензор *G12-3A07PA*

Табела 5.5. Оптички сензор *Q&W* типа *G12-3A07PA*

Тип сензора	/	Дифузни
Напон напајања	[VDC]	6~36
Начин повезивања	/	PNP
Врста контакта	/	NO
Растојање мерења	[cm]	7
Контролни излаз	[mA]	200
Потрошња	[mA]	<15
Време одзива	[ms]	<2
Угао мерења	[°]	3~10
Температура окружења	[°C]	-25~+55
Интензитет осветљења	[LX]	Природно осветљење: <10000
		Вештачко осветљење: <3000
Кућиште	/	метално
Заштита	/	IP54

За прекид процеса ливења предвиђена је употреба мерне ћелије за мерење тежине. У конкретном случају предвиђена је мерна ћелија типа *CZL602-10Kg*, која је приказана на слици 5.16, а чије су техничке карактеристике дате у табели 5.6.



Слика 5.16. Мерна ћелија *CZL602-10Kg*

Табела 5.6. Техничка спецификација мерне ћелије *CZL602-10Kg*

Максимална грешка	[% F.S.]	0,03
Излаз	[mV/V]	2±0,02
Нелинеарност	[% F.S.]	0,03
Поновљивост	[% F.S.]	0,02
Нула	[% F.S.]	1
Улазни отпор	[Ω]	350±5
Излазни отпор	[Ω]	350±5
Отпор изолације	[MΩ]	>=5000
Напајање	[V]	9~12
Заштита	/	IP66

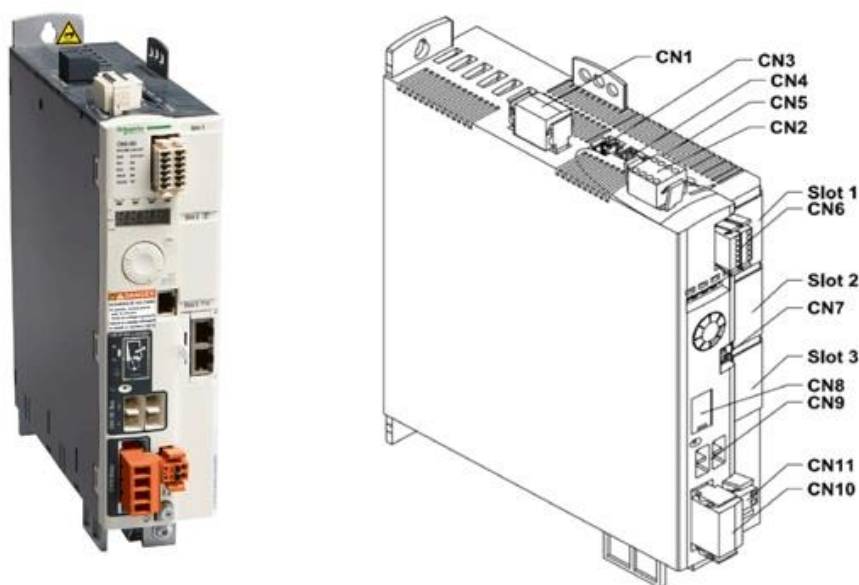
5.2.3. Управљачке компоненте

Представљање управљачких компоненти, експерименталног лабораторијског постројења, започето је од драјвера серво мотора као погонске јединице ротационог кретања ливачког лонца. Наиме, предвиђени драјвер за серво мотор *BSH055* је *Lexium LXM32M*. *Lexium 32* фамилија производа састоји се од три модела серво контролера који покривају различите области примене, као и широк опсег опција и додатака. Контролери су веома компактни, високих перформанси, за широк опсег енергетских захтева. Неке од карактеристика *Lexium LXM32M* серво погона:

- Флексибилност, може да се прилагоди различитим захтевима, захваљујући бројним модулима.
- Доступни модули обухватају *fieldbus CANopen/CANmotion, DeviceNet Profibus DP* и *Ethernet/IP*.
- Енкодер модул омогућава да се дода други енкодер интерфејс за дигиталне енкодере, аналогне или резолвере,

- Слот за меморијску картицу је обезбеђен за *backup* и копирање параметара за брзу замена уређаја.
- Сигурносна функција "*Safe Torque Off*" (*STO*) по ИЕС 61800-5-22, искључује момент мотора безбедно без прекидања напона напајања. Опциони модул за безбедност *eSM* нуди додатне безбедносне функције.

Lexium LXM32 серво претварач интегрише различите оперативне модове, омогућавајући тако широку примену у индустрији. Преглед прикључака драјвера *Lexium LXM32* дат је на слици 5.17. и у табели 5.7.



Слика 5.17. Серво драјвер *Lexium LXM32M* и преглед његових прикључака

Табела 5.7. Преглед прикључака *Lexium LXM32*

Прикључак	Опис	
CN1	Мрежни прикључак	
CN2	Прикључак:	- напајање 24V
		- безбедосна функција <i>STO</i>
CN3	Прикључак за енкодер мотора (<i>Encoder 1</i>)	
CN4	Прикључак за <i>PTO</i> (енгл. <i>Pulse Train Output</i>)	
CN5	Прикључак за <i>PTI</i> (енгл. <i>Pulse Train Input</i>)	
CN6	Улази/излази:	-6 дигиталних улаза
		-3 дигитална излаза
CN7	<i>Modbus</i> комуникација	
CN8	Прикључак за спољни кочиони отпорник	
CN9	<i>DC bus</i> прикључак	
CN10	Прикључак фаза мотора	
CN11	Прикључак моторне кочнице	
Slot 1	Слот за безбедности модул	
Slot 2	Слот за енкодерски модул	
Slot 3	Слот за <i>fieldbus</i> модул	

Драјвер за погонску јединицу транслаторног кретања, коју представља корачни мотор, је микро корачни драјвер *SD4350*. Основне особине микроstep драјвера *SD4350*:

- 16 подесивих резолуција корака,
- Напон напајања *24-50VDC*, оптимално *36VDC*.
- Погодан за двофазне и четворофазне степ моторе.
- Излазне струје до *4,25A*.
- *DIP* прекидач за подешавање 8 различитих вредности струје.
- Оптички изоловани улазни сигнали.
- Фреквенцију импулса до *200kHz*.
- Аутоматско смањење струје.
- Мала величина (*122.2x90x33mm*), тежина: *0.3kg*.

SD4350 има два конектора, *P1* – за контролне сигнале и *P2* – енергетски прикључак. Табеле 5.8. и 5.9. дају кратак опис два конектора.



Слика 5.18. Корачни драјвер *SD4350*

Табела 5.8. Опис конектора *P1*

Пин	Опис
PUL+, PUL-	Представља улазни сигнал. Када је напон 4-5V, тада је <i>PUL-HIGH</i> , а када је 0-0,5V тада је <i>PUL-LOW</i> . За исправан рад трајање <i>pulse</i> сигнала требало би бити дуже од 5μs. За везивање на 12V или 24V потребно је користити отпорнике.
DIR+, DIR-	У импулсном моду, то је сигнал ниске/високе величине напона и представља два смера ротације мотора. <i>DIR</i> сигнал би требао бити испред <i>PULL</i> сигнала за 5μs. Када је напон 4-5V, тада је <i>DIR-HIGH</i> , а када је 0-0,5V тада је <i>DIR-LOW</i> .
ENA+	Овај сигнал се користи за омогућавање/онемогућавање рада драјвера. Висок ниво напона омогућава рад драјвера, а низак ниво онемогућава.
ENA-	Обично није спојен(опционо)

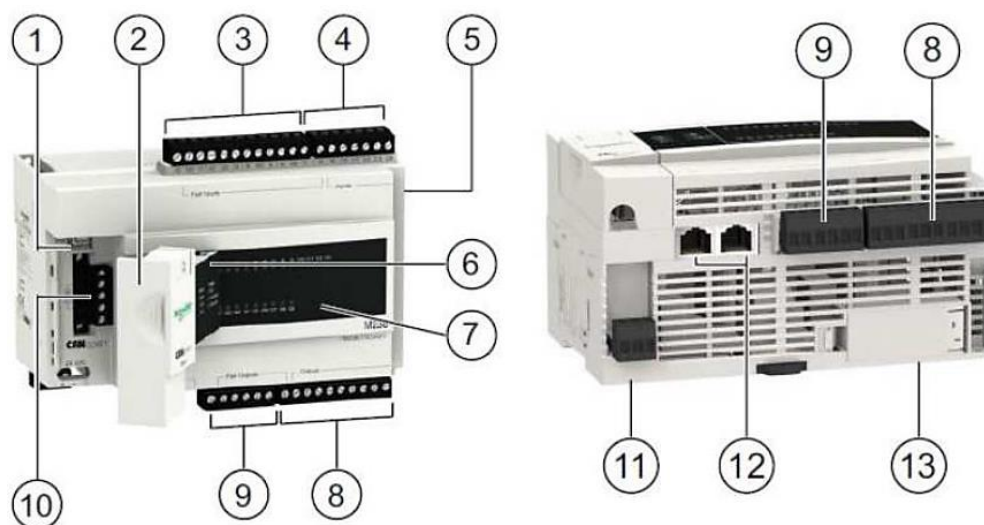
Табела 5.9. Опис конектора P2

Пин	Опис
GND	DC уземљење
+V	Једносмерно напајање, 24-50VDC, укључујући и флукутацију напона
A+, A-	Прикључни крајеви А фазе мотора
B+, B-	Прикључни крајеви В фазе мотора

Табела 5.10. Електричне карактеристике (Температура околине $T_j=25^{\circ}\text{C}$)

Параметри		Минимална	Номинална	Максимална
Излазна струја	[A]	0,71	3 (RMS)	4,25 (PEAK)
Напон напајања	[VDC]	20	36	50
Логички струјни сигнал	[mA]	6	10	30
Улазна фреквенција пулса	[KHz]	0	/	200
Отпор изолације	[MΩ]	500	500	500

У аутоматизованим системима *PLC* контролер је обично главни субјект управљања. Извршавањем програма смештеног у програмској меморији, *PLC* непрекидно посматра стање система преко улазних уређаја. На основу логике имплементиране у програму, *PLC* одређује које акције треба да се изврше на излазним уређајима. У конкретной експерименталној лабораторијској поставци коришћен је *PLC Schneider Electric* серије *M238*, типа *TM238LFDC24DT* (Слика 5.19).



Слика 5.19. *PLC Schneider Electric* серије *M238* типа *TM238LFDC24DT*

Нумерисани елементи приказаног контролера су следећи:

1. *USB Mini-E* порт, програмирајући порт. Преко овог порта врши се унос података у *PLC*.
2. Поклопац.
3. Брзи бројачки улази.
4. Класични улази.
5. Конектор за додатне аналогне и дигиталне улазе.

6. Дисплеј који показује стање *PLC*-овог процесора.
7. Дисплеј који показује стање логичких улаза и излаза.
8. Класични транзисторски излази.
9. Брзи транзисторски излази.
10. *CAN open* конекција.
11. Конектор за напајање.
12. Конектори *RJ45* служе за серијску комуникацију.
13. Решеткисти поклопац испод кога се налази батерија за *RAM* меморију.

У табели 5.11. наведене су основне карактеристике напајања *PLC* контролера, типа *TM238LFDC24DT*.

Табела 5.11. Напајање *PLC*-а серије *M238* типа *TM238LFDC24DT*

Називни напон U_n		[VDC]	24 (дозвољено одступање 4,8V)
Максимална струја удара при U_n		[A]	35
Дозвољено трајање прекида напајања		[ms]	10
Максимална потрошња по модулима		[W]	17,2
Диелектрична снага	Између извора напајања и уземљеног краја	[VDC]	500 (у трајању од 1 min)
	Између I/O модула и уземљеног краја	[VDC]	
Изолациона отпорност	Између извора напајања и уземљеног краја	[MΩ]	>10 (за напон <500VDC)
	Између I/O модула и уземљеног краја	[MΩ]	>1 (за напон <500VDC)

Подаци у табели 5.11. дају основне информације о електричној издржљивости овог *PLC*-а. Од корисника се не очекује да памти ове податке, али свакако треба да има представу о потрошњи уређаја и дозвољеном прекиду напајања. Најважнији податак и податак који треба запамтити је да је номинални напон напајања 24VDC са одступањем од $\pm 4,8V$.

Табела 5.12. Основне карактеристике стандардних логичких улаза (енгл. *normal inputs*)

Број улазних канала		/	6
Називни улазни напон		[VDC]	24
Заједнички улази		/	I
Дозвољено одступање улазног напона		[VDC]	19,2-30
Називна улазна струја		[mA]	10,4
Улазна импеданса		[kΩ]	2,3
Улазне граничне вредности	Стање логичке 1 (напон/струја)	[VDC/mA]	>15/>2
	Стање логичке 0 (напон/струја)		<5/<1,5
Време укључења		[ms]	<1
Време искључења		[ms]	<1
Максимална дужина кабла		[m]	30

Стандардни логички улази служе за прикупљање података из околине. Овај *PLC* поседује само дигиталне улазе. Ови дигитални улази називају се стандардним тј. обичним из разлога што не могу да региструју претерано брзе промене улазног сигнала. За корисника значајни подаци из табеле би били подаци о улазном напону и номиналној улазној струји. Посебно важан податак је стање логичке нуле и јединице, односно колики напон треба довести на улаз да би га *PLC* видео као логичку јединицу. Из табеле се види да је то напон од бар $15V$ при струји већој од $2mA$. Напони испод $5V$ и струје ниже од $1,5mA$ су дефинитивно логичке нуле. Вредности између нису дефинисане и обично се називају пливајући напони. Те вредности треба избегавати при раду.

Табела 5.13. Основне карактеристике брзих улаза (енгл. *fast inputs*)

Број брзих улазних канала		/	8
Називни улазни напон		[VDC]	24
Заједнички улази		/	по 4
Дозвољено одступање улазног напона		[VDC]	19,2-30
Називна улазна струја		[mA]	8
Улазна импеданса		[kΩ]	3
Улазне граничне вредности	Стање логичке 1 (напон/струја)	[VDC/mA]	>15/>2
	Стање логичке 1 (напон/струја)		<5/<1,5
Време укључења		[ns]	300
Време искључења		[ns]	300
Максимална дужина кабла		[m]	10

По карактеристикама логичке нуле и јединице, ови улази су исти као и обични. Главна карактеристика ових улаза је време укључења и време искључења које је врло мало $300ns$. Ови улази су више од 1000 пута бржи од обичних, што им даје могућност да прихвате брзу промену улазног сигнала. Ред фреквенције које могу прихватити је $10kHz$.

Табела 5.14. Основне карактеристике стандардних транзисторских излаза

Број излазних канала		/	6
Излазни напон напајања		[VDC]	24
Максимална излазна струја		[mA]	500
Заједнички излази		/	по 2
Време одзива		[ms]	<1
Максимална дужина кабла		[m]	30
Изолација	Између излаза	[V]	500
	Између излаза и унутрашње електронике		

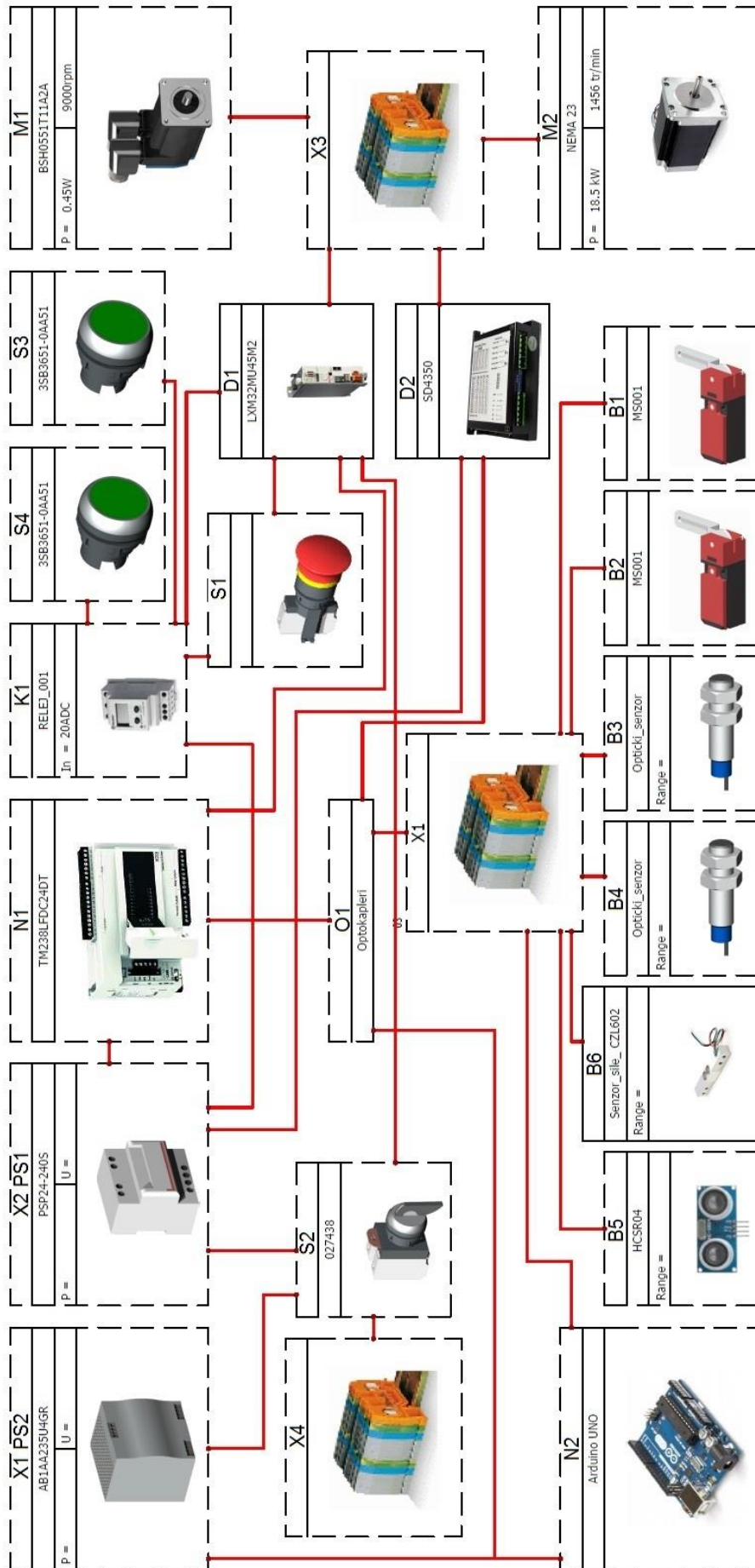
Табела 5.15. Основне карактеристике брзих бројачких излаза

Број излазних канала		/	4
Излазни напон напајања		[VDC]	24
Максимална излазна струја	Нормални режим	[mA]	500
	PWM/FG/PTO		100
Заједнички излази		/	по 1
Време одзива	Нормални режим	[ms]	<1
	PWM/FG/PTO		<0,25
Максимална дужина кабла	Нормални режим	[m]	30
	PWM/FG/PTO		10
Струја цурења		[mA]	0,3
Изолација	Између излаза	[V]	500
	Између излаза и унутрашње електронике		

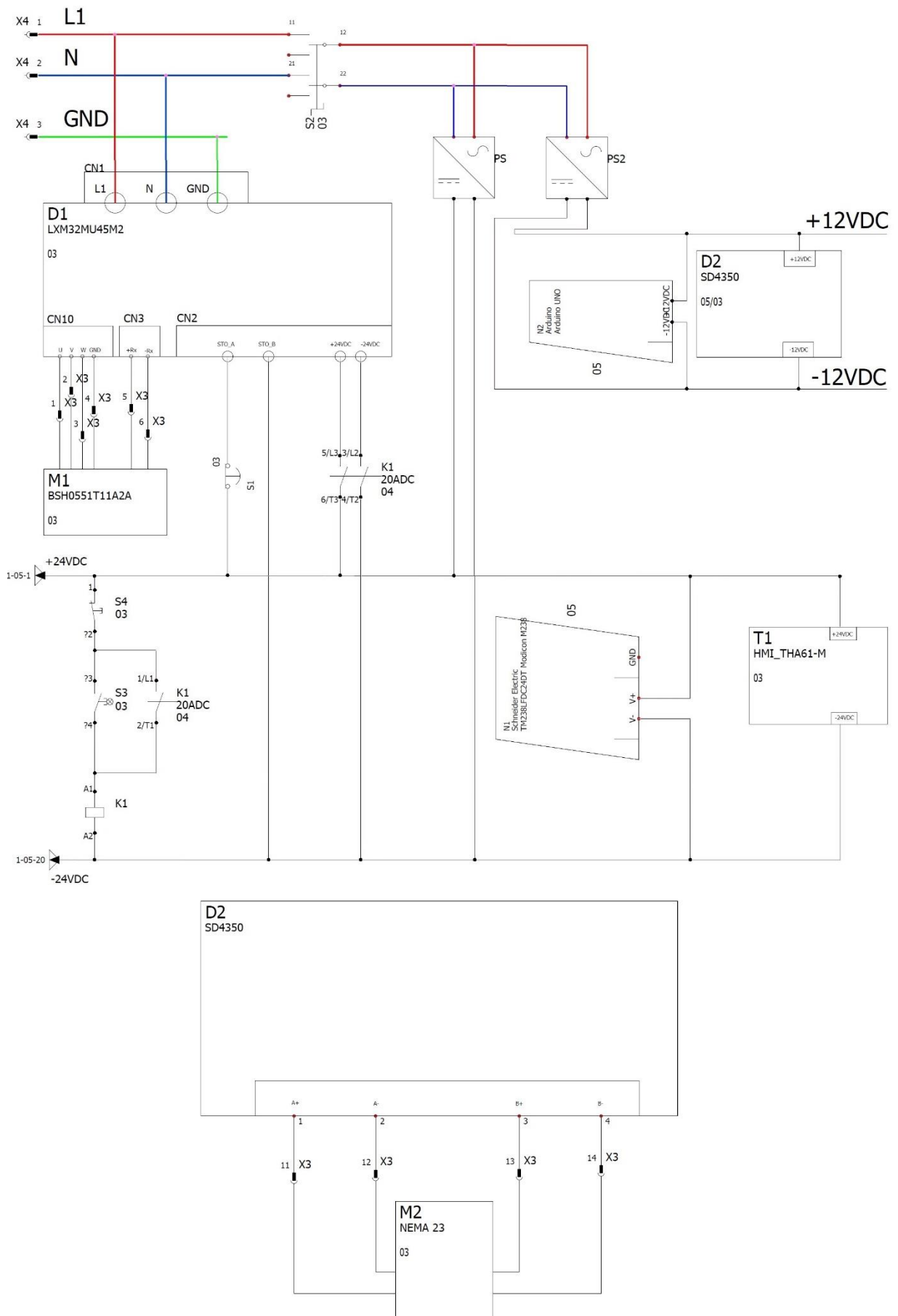
Брзи бројачки излази су излазни канали који имају могућност генерисања пулсева високе учестаности. Пулсеви из ових излаза користе се као управљачки импулси за контролу фреквентних регулатора или драјвера за управљање корачним моторима.

На слици 5.20. дата је уопштена шема повезивања наведених компоненти у експерименталној лабораторијској поставци. Ознаке на приказаној шеми имају следећа значења:

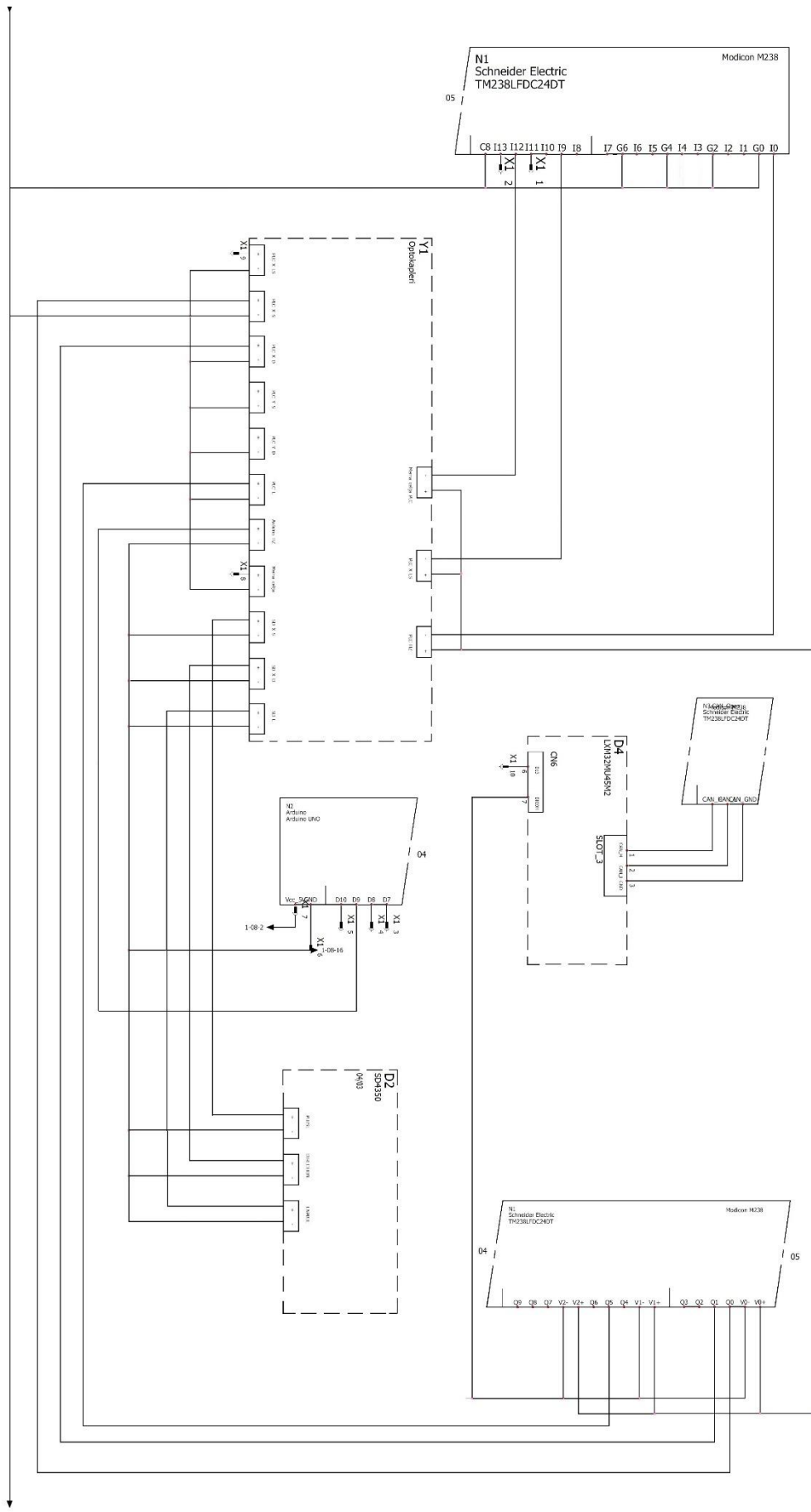
- X1 PS2 – напајање 5V,
- X2 PS1 – напајање 24V,
- N1 – PLC контролер,
- K1 – релеј *set – reset*,
- S4 – тастер 1,
- S3 – тастер 2,
- M1 – AC серво мотора *BSH055*,
- X4 – редне клеме,
- S2 – гребенасти прекидач,
- O1 – оптокаплери,
- S1 – *emergency stop*,
- D1 – Серво драјвер *Lexium LXM32M*,
- X3 – редне клеме,
- X1 – редне клеме,
- D2 – Корачни драјвер *SD4350*,
- N2 – *Arduino UNO* – аквизиција за ултразвучни сензор,
- B5 – Ултразвучни сензор *Arduino HCSR04*,
- B6 – Мерна ћелија *CZL602-10Kg*,
- B3 и B4 – Оптички сензори *G12-3A07PA*,
- B1 и B2 – гранични прекидачи за линеарно кретање лонца (позиција 1 и 2),
- M2 – корачни мотор *NEMA 23 - SB57B003*.



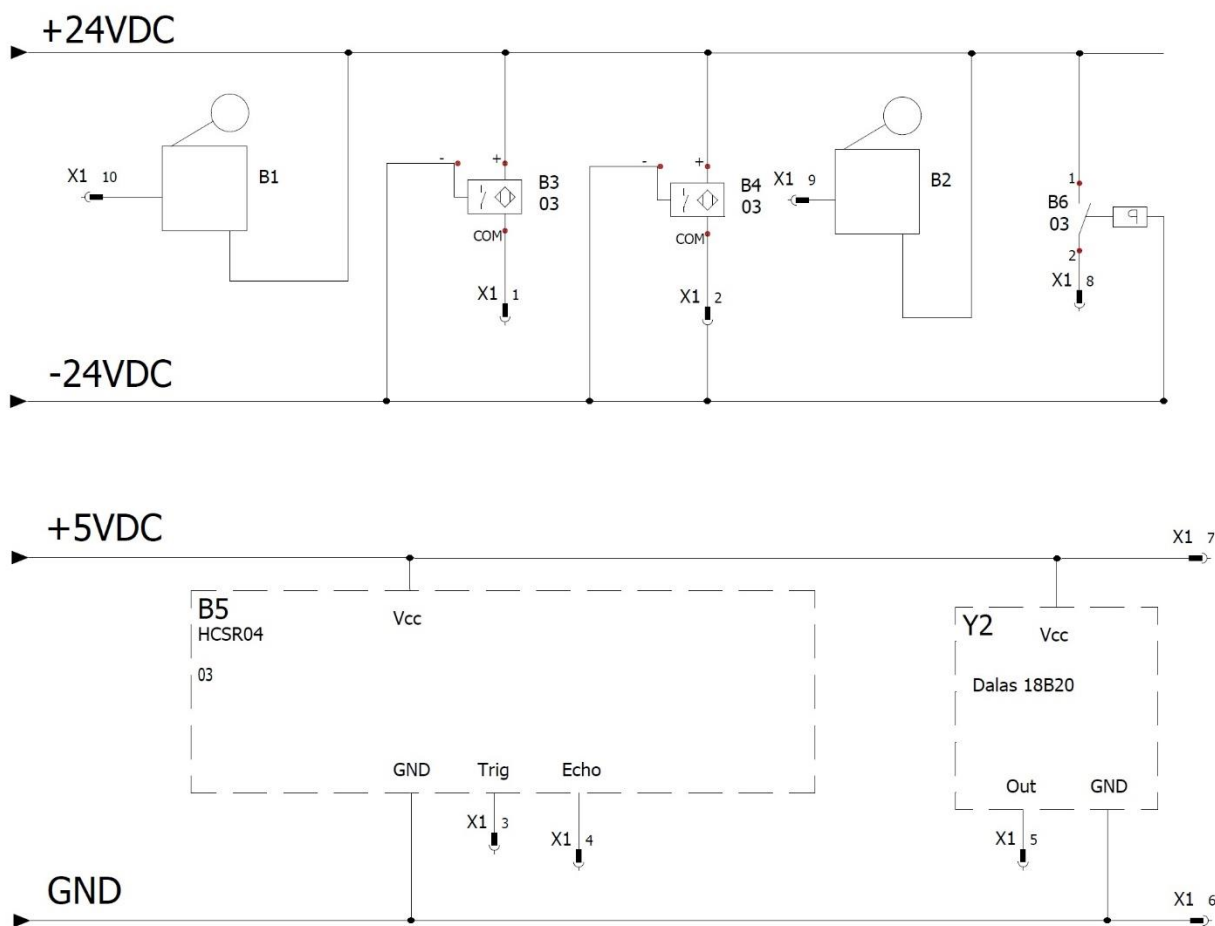
Слика 5.20. Општа шема повезивања компоненти лабораторијске поставке



Слика 5.21. Повезивање компоненти – енергетска шема



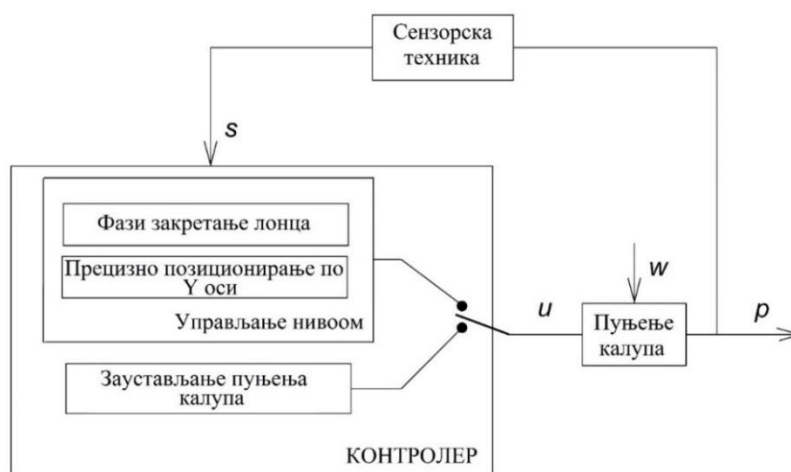
Слика 5.22. Повезивање компоненти – управљачка шема



Слика 5.23. Повезивање компоненти – сензорска техника

5.3. ФАЗИ И НЕУРО ФАЗИ УПРАВЉАЊЕ ПРОЦЕСОМ ЛИВЕЊА

Основна идеја овог дела петог поглавља јесте да представи могућност примене фази и неуро фази управљања на процес ливења. Императив управљања је, као што је то истакнуто кроз предлог аутоматизованог система, прецизно пуњење калупа дефинисано трима кључним тачкама: прецизно падање млаза у уливну чашу, одржавање константног нивоа истопљеног метала у чаши и елиминисање преливања истопљеног метала из калупа. Управљање процесом ливења, према логици изложеној у подпоглављу 5.1. симулирано је на већ описаној експерименталној лабораторијској поставци. Прецизно падање млаза у уливну чашу и одржавање константног нивоа у уливној чаши су процеси који се одвијају паралелно током пуњења калупа. Њихова реализација је заснована на употреби информација са ултразвучног сензора, оптичких сензора и енкодера на серво мотору. Као што је већ напоменуто у подпоглављу 5.1. пар оптичких сензора има функцију граничних прекидача јер формира зону предвиђену за пад млаза. Наиме, када млаз пресече споп сензора активира се translација лонца по Y оси како би се млаз увео у зону између сензора. Са становишта управљања много комплекснији задатак је одржавање константног нивоа у уливној чаши током пуњења калупа. Ултразвучни сензор мери ниво у комори која је повезана са уливном чашом, и шаље информације о промени нивоа. Енкодер серво мотора шаље информацију о тренутној позицији лонца, тј. његовом углу закретања. На основу информација о нивоу у чаши и тренутне позиције лонца, мења се брзина закретања лонца. Креирање функције промене брзине закретања лонца у зависности од промене нивоа у чаши и позиције лонца, представља примарни циљ овог сегмента управљања процесом. Наведени сегмент управљања биће заснован на пројектовању фази и неуро фази регулатора, који ће бити интегрални део целокупног управљачког система.

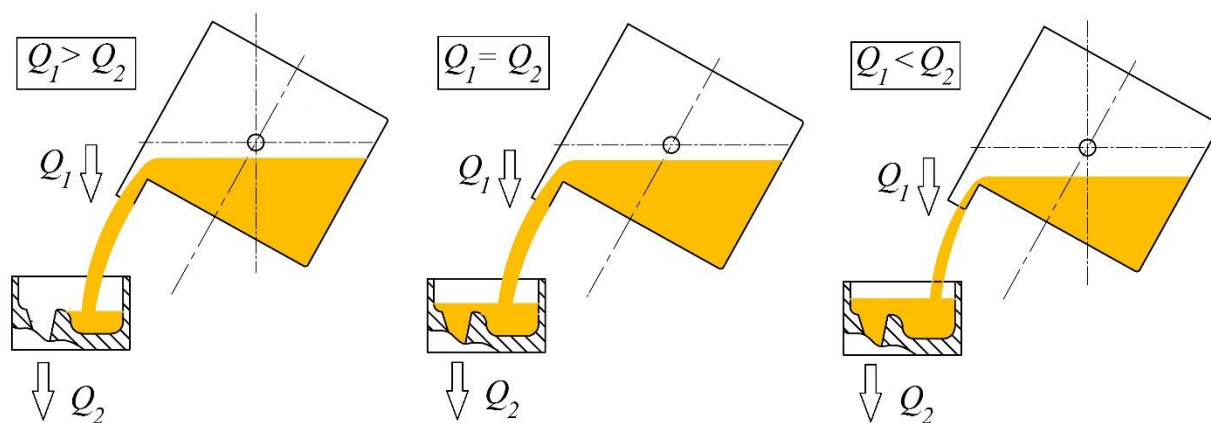


Слика 5.24. Структура управљачког система

Елиминисање преливања из калупа омогућује сензор тежине који прекида процес симулације ливења када се достигне жељена маса симулационог модела калупа. У конкретном случају, маса заустављања процеса је $m = 3.5\text{kg}$, дефинисана на основу запремине симулационог калупа (до нивоа пуњења) и густине воде. Прекид ливења подразумева заустављање два претходно наведена паралелна сегмента управљања, тј. закретање лонца око X осе и прецизна translација по Y осе. На слици 5.24. дата је структура управљачког система, где је: $u = [n, f]$ – улазна величина (n – број обртаја серво мотора, f – фреквенција за корачни мотор), $p = [h, \alpha, m, y]$ – излазна величина (h – ниво у чаши, α – угао закретања лонца, m – маса калупа, y – позиција по Y осе), w – поремећај, s – сигнали са сензора.

5.3.1. Пројектовање фази и неуро фази регулатора

Пројектовање фази и неуро фази регулатора извршено је за најкомплекснији сегмент управљања процесом ливења, за одржавање нивоа у уливној чаши. Тај део је у целокупној структури управљачког система, на слици 5.24. означен као “фази закретање лонца“. Фази регулатор се формира као скуп правила која успостављају везу између вредности излаза из система и процеса управљања које те вредности излаза доводи до жељених вредности. На бази закључка, проистеклог из познавања процеса, да је брзина закретања лонца у функцији нивоа флуида (обојене воде) у уливној чаши и угла закренутости лонца, дефинишу се улазне и излазне променљиве. Како сигнали нивоа флуида у уливној чаши и угла закренутости лонца представљају услов, а сигнал брзине закретања лонца последицу, то јасно указује да су улазне величине у фази регулатор ниво флуида у уливној чаши и угао закретања лонца, а излазна величина је брзина закретања лонца. Наредни корак у пројектовању фази регулатора јесте избор атрибута, узимајући у обзир карактеристике експерименталне лабораторијске поставке (извршни органи, мерна опрема...), као и природу процеса. Да би се лакше формирали одговарајући атрибути, иницијално су посматрани случајеви односа протока (Q_1, Q_2) приказани на слици 5.25. Први случај ($Q_1 > Q_2$) представља сам почетак сипања и захтева да се лонац закреће максималном брзином до достизања жељеног нивоа у чаши. Други случај ($Q_1 = Q_2$) је стање равнотеже које омогућује одржавање нивоа на жељеној вредности и захтева константност брзине закретања. Трећи случај ($Q_1 < Q_2$) је тренутак сипања који захтева смањење брзине закретања лонца која би обезбедила повратак у “случај два“ ($Q_1 = Q_2$).

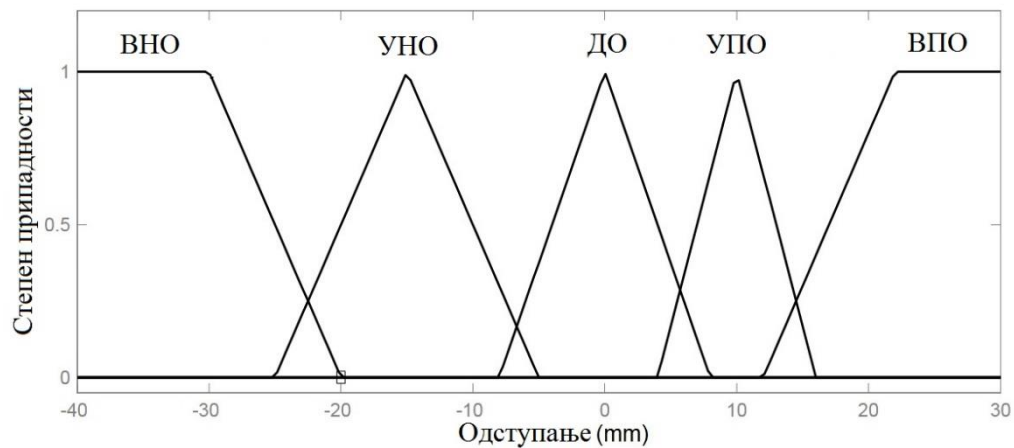


Слика 5.25. Односи протока за три случаја током процеса пуњења

Поред брзине закретања лонца веома важну улогу у промени нивоа у уливној чаши има тренутни положај лонца, тј. угао закренутости лонца. Са повећањем угла закретања лонца, расте и проток Q_1 , самим тим и ниво у уливној чаши. Уколико ниво у уливној чаши надмашује жељену вредност уследиће смањење брзине закретања како би се смањила и вредност величине Q_1 . Синхронизација брзине и угла закретања лонца како би се ниво одржао на жељеној вредности, у наставку названом референтном вредношћу, у уливној чаши представља круцијални задатак овог фази контролера. Дакле, прва улазна променљива је ниво флуида у уливној чаши, тачније одступање нивоа од његове референтне вредности. Укупан интервал нивоа флуида у уливној чаши износи од 40–110mm. Вредност $h = 40mm$ представља растојање између ултразвучног сензора и горње површине симулационог модела калупа, а вредност $h = 110mm$ представља растојање између ултразвучног сензора и дна коморе за мерење нивоа у симулационом моделу калупа, у почетној поставци експеримента. Жељена вредност нивоа је $h_{ref.} = 70mm$, што је заправо растојање између ултразвучног сензора и површине жељеног нивоа течности у комори за мерење нивоа. На бази претходно наведеног, формирано је пет атрибута који описују прву улазну величину. За формирање фази скупова коришћене су троугаоне и трапезоидне функције (Слика 5.26). Атрибути су формирани на основу релације: $h_{ref.} - h$.

Њихови називи су:

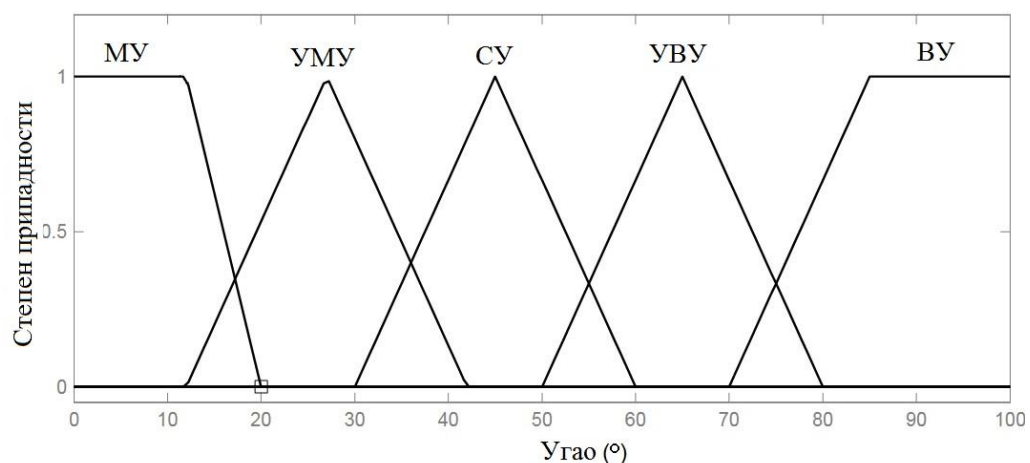
- велико негативно одступање (ВНО),
- умерено негативно одступање (УНО),
- дозвољено одступање (ДО),
- умерено позитивно одступање (УПО),
- велико позитивно одступање (ВПО).



Слика 5.26. Фази скупови првог улаза

Интервал друге улазне величине - позиције лонца, су углови од 0 до 100 степени. За формирање фази скупова коришћене су, као и код прве улазне величине, троугаоне и трапезоидне функције, а називи атрибута су следећи:

- мали угао (МУ),
- умерено мали угао (УМУ),
- средњи угао (СУ),
- умерено велики угао (УВУ),
- велики угао (ВУ), (Слика 5.22).

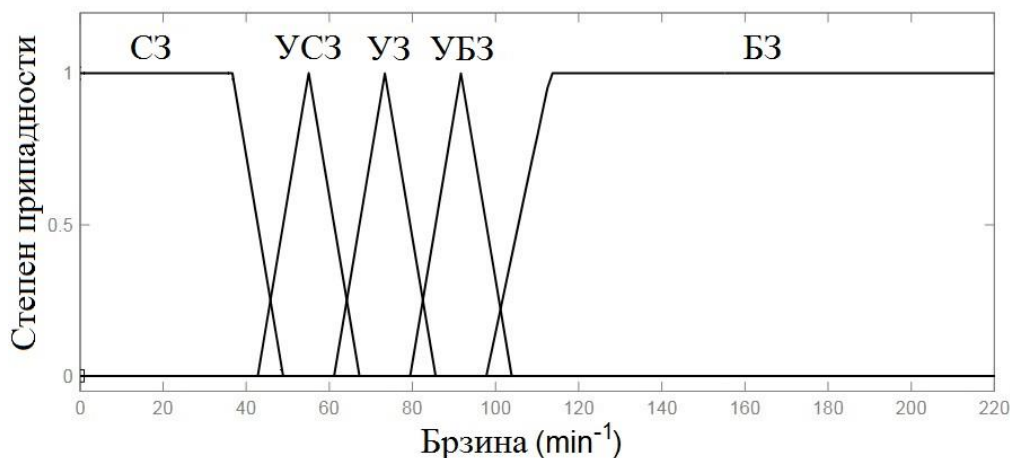


Слика 5.27. Фази скупови другог улаза

Атрибути излазне величине, брзине закретања лонца, су следећи:

- споро закретање (СЗ),
- умерено споро закретања (УСЗ),
- умерено закретање (УЗ),
- умерено брзо закретање (УБЗ) и
- брзо закретања (БЗ).

За формирање фази скупова такође су коришћене троугаоне и трапезоидне функције (Слика 5.28).



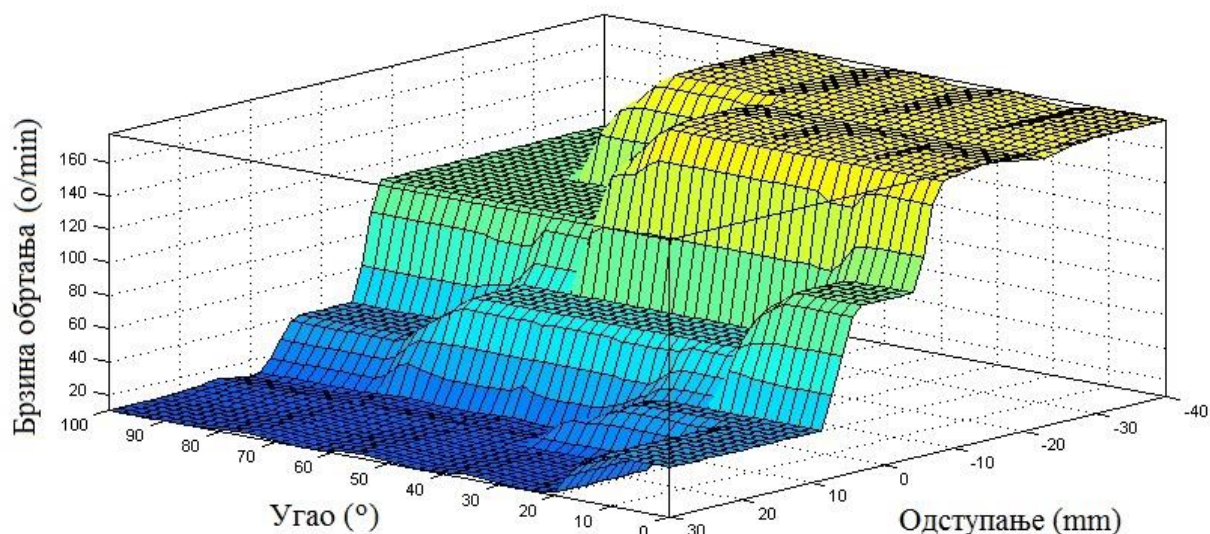
Слика 5.28. Фази скупови излаза

Непозната функција управљања се апроксимира правилима која се добијају на основу искуства у вођењу посматраног процеса. Спецификација правила фази модела контролера дата је у табели 5.16.

Табела 5.16. Спецификација фази правила

	Угао: МУ	Одступање: ВНО	Брзина: БЗ
	Угао: МУ	Одступање: УНО	Брзина: БЗ
	Угао: МУ	Одступање: ДО	Брзина: УБЗ
	Угао: МУ	Одступање: УПО	Брзина: УСЗ
	Угао: МУ	Одступање: ВПО	Брзина: УСЗ
	Угао: УМУ	Одступање: ВНО	Брзина: БЗ
	Угао: УМУ	Одступање: УНО	Брзина: БЗ
	Угао: УМУ	Одступање: ДО	Брзина: УЗ
	Угао: УМУ	Одступање: УПО	Брзина: УСЗ
	Угао: УМУ	Одступање: ВПО	Брзина: СЗ
	Угао: СУ	Одступање: ВНО	Брзина: БЗ
	Угао: СУ	Одступање: УНО	Брзина: БЗ
АКО ЈЕ	Угао: СУ	И Одступање: ДО	ОНДА Брзина: УЗ
	Угао: СУ	Одступање: УПО	ЈЕ Брзина: СЗ
	Угао: СУ	Одступање: ВПО	Брзина: СЗ
	Угао: УВУ	Одступање: ВНО	Брзина: БЗ
	Угао: УВУ	Одступање: УНО	Брзина: УБЗ
	Угао: УВУ	Одступање: ДО	Брзина: УЗ
	Угао: УВУ	Одступање: УПО	Брзина: СЗ
	Угао: УВУ	Одступање: ВПО	Брзина: СЗ
	Угао: ВУ	Одступање: ВНО	Брзина: УБЗ
	Угао: ВУ	Одступање: УНО	Брзина: УБЗ
	Угао: ВУ	Одступање: ДО	Брзина: УСЗ
	Угао: ВУ	Одступање: УПО	Брзина: СЗ
	Угао: ВУ	Одступање: ВПО	Брзина: СЗ

Атрибути, фази скупови и правила су карактеристике фази логике које захтевају редефинисања како би се добили задовољавајући резултат. Тешко је очекивати да ће први покушаји формулисања наведених карактеристика дати задовољавајуће резултате. И у овом случају атрибути, фази скупови и правила редефинисани су у току симулације процеса, а представљени су они скупови, атрибути и правила за које је симулација процеса управљања дала задовољавајуће резултате. На слици 5.29. приказана је фази управљачка површ, на којој је представљена брзина закретања лонца у функцији угла закренутости истог и одступања од референтног нивоа у уливној чаши.

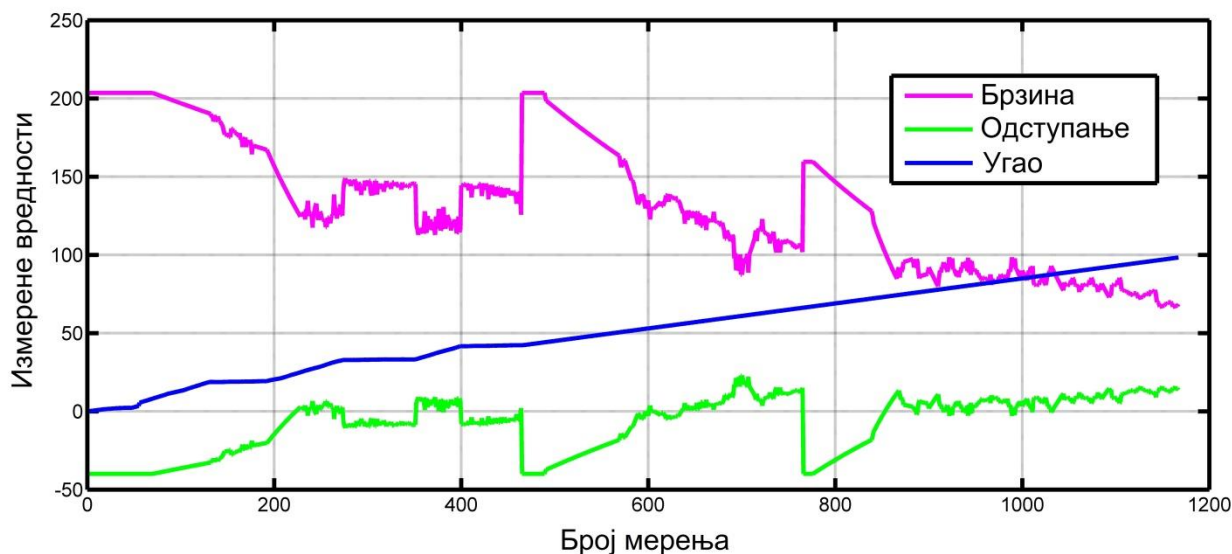


Слика 5.29. Фази управљачка површ

Са слике се јасно види да се брзина закретања лонца смањује са порастом угла закретања и смањењем негативног одступања од референтног нивоа у уливној чаши. Највиша вредност брзине је за велико негативно одступање и мали угао закренутости лонца.

Пројектовање неуро фази регулатора има за циљ да прецизност процеса учини још већом. Наиме, на основу изложене методологије пројектовања фази регулатора јасно је да је дефинисање базе правила, атрибута и функција припадности захтеван и сложен процес. Неуро фази регулатор садржи адаптациони механизам, сличан механизму учења код неуро мрежа, који врши модификацију управљачких правила, промену тежинских фактора придружених фази правилима управљања у бази правила, модификацију фази скупа... У конкретном случају биће употребљен фази система за закључивање заснован на адаптивној мрежи – *ANFIS*. Његов принцип је веома јасан и заснован на методама фази моделирања и учења на основу задатог скупа података. Дакле, примарни задатак је формирање квалитетног скупа података на основу кога ће бити креиран фази регулатор са неуро темељом. У те сврхе извршен је значајан број експерименталних симулација

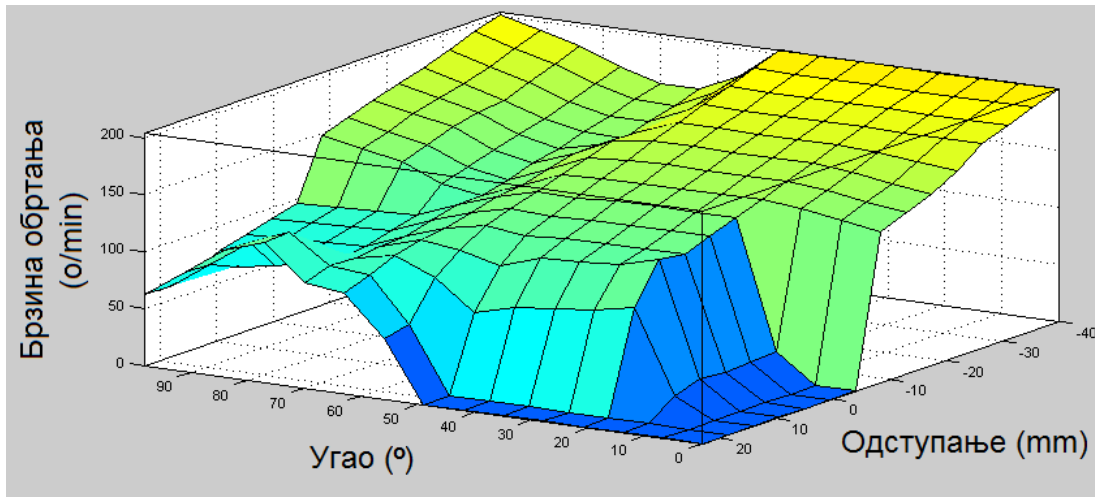
процеса сипања како би се направила аквизиција оних података који су део најуспелије симулације, илити жељеног начина пуњења калупа. Симулирано је целокупно пражњење лонца и пуњење три калупа. Графички приказ адекватних података за изграђу неуро фази система дат је на слици 5.30.



Слика 5.30. Графички приказ података за обуку неуро фази регулатора

ANFIS користи представљени скуп података и хибридно правило учења, у процесу доношења одлука које промене треба извршити у већ представљеном фази регулатору да се добије жељени излаз, односно да се минимизира грешка. Дакле, улаз у фази структуру *ANFIS* – *a* је идентичан оном који је дефинисан при пројектовању фази регулатора. Њега сачињавају две величине: одступање {велико негативно одступање (ВНО), умерено негативно одступање (УНО), дозвољено одступање (ДО), умерено позитивно одступање (УПО), велико позитивно одступање (ВПО)} и угао {мали угао (МУ), умерено мали угао (УМУ), средњи угао (СУ), умерено велики угао (УВУ), велики угао (ВУ)}. Припадајуће функције и њихови опсези су, такође, идентични као и код раније креираног фази регулатора. Излазна функција је линеарног карактера. Квадратна грешка, након 1500 епоха износи 0.92 у фази обуке, док у фази тренинга, у коме је учествовао сет од 90 података, средња квадратна грешка износи 1.4. На слици 5.31. дат је приказ неуро фази управљачке површи, на којој је представљена брзина закретања лонца у функцији угла закренутости истог и одступања од референтног нивоа у уливној чаши. Као и у случају фази управљачке површи, приметно је да се брзина закретања лонца смањује са порастом угла закретања и смањењем негативног одступања од референтног нивоа у уливној чаши. Највиша вредност брзине је за велико негативно одступање и мали угао закренутости лонца. Такође је приметан и несклад неуро фази управљачке површи у сегментима који са

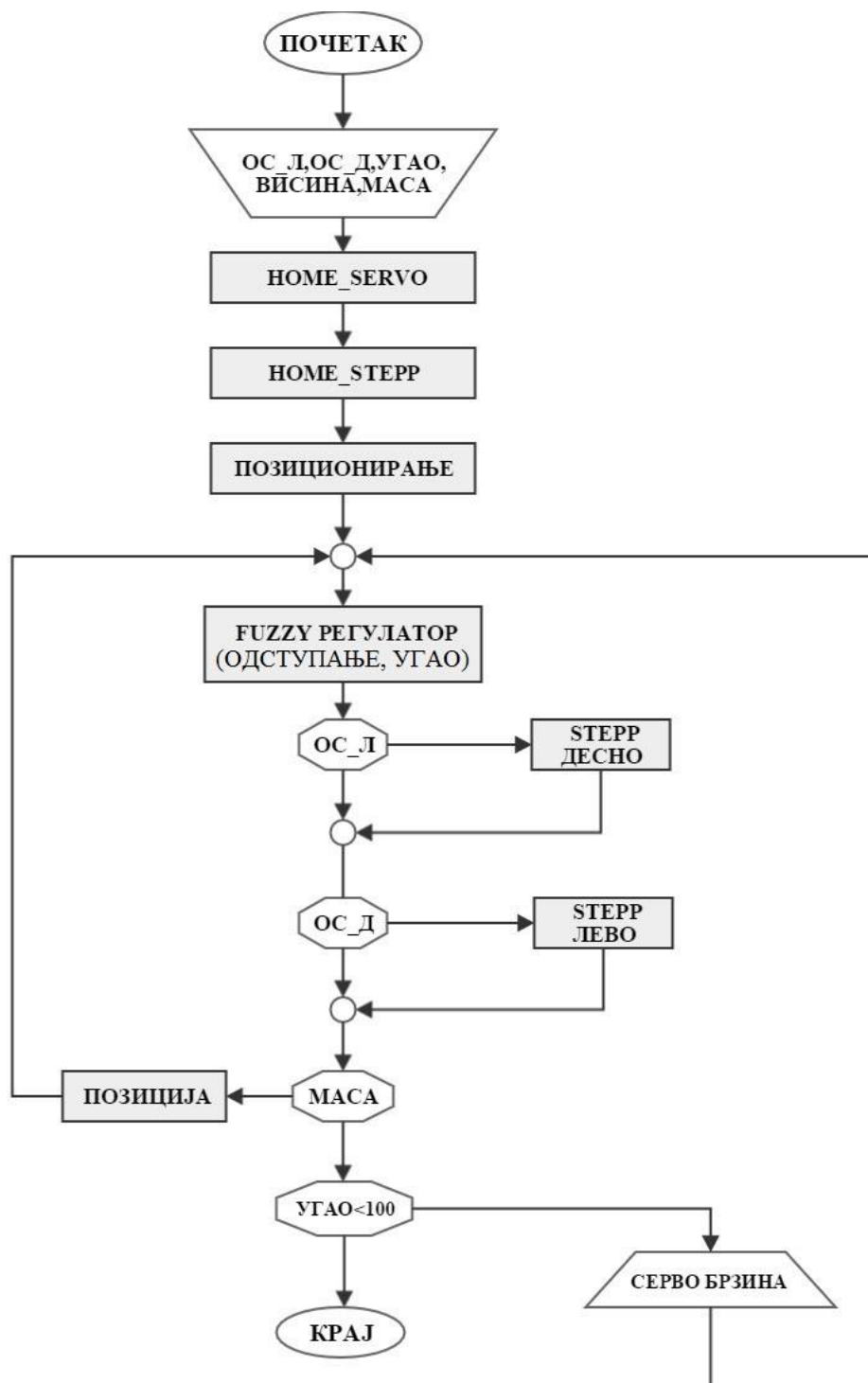
аспекта података нису били покривени током процеса учења. То је део површи где је одступање велико позитивно, а угао веома мали. Таква ситуација је у пракси била немогућа, и у складу са тим подаци за такву ситуацију нису постојали. Још један такав сегмент управљачке површи је онај где је угао велики, скоро па максималан а одступање велико негативно. Таква ситуација је реална, уколико у лонцу нема довољно материјала за попуну последњег калуца. Међутим, у конкретном примеру то није био случај, тако да је и тај део површи био без својих репрезентата у фази обуке.



Слика 5.31. Неуро фази управљачка површ

5.3.2. Имплементација фази и неуро фази регулатора у управљачки систем

Управљачки систем процеса ливења, чија је структура дата на слици 5.24., функционише по алгоритму приказаном на слици 5.32.



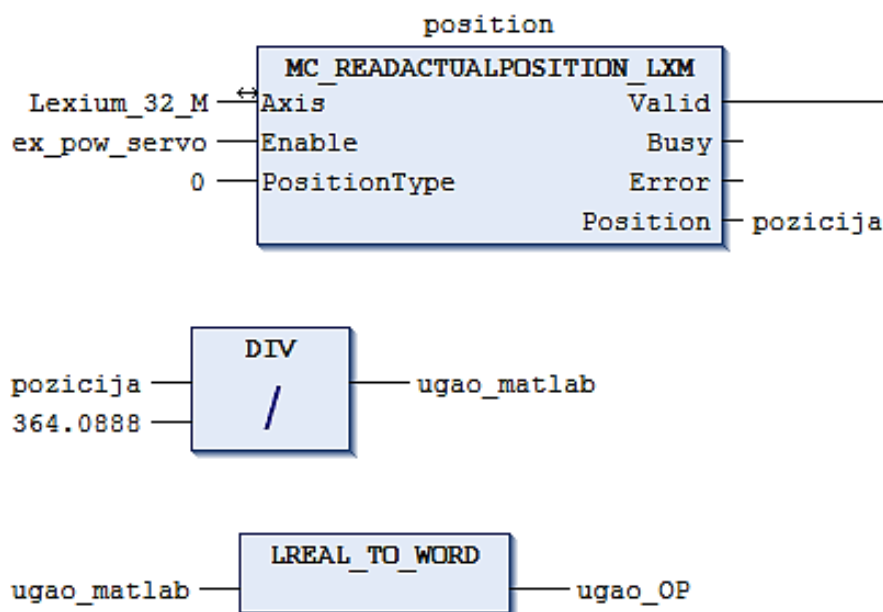
Слика 5.32. Алгоритам рада управљачког система

Софтверску подршку реализацији представљене логике управљања процесом у управљачком систему пружа софтверски пакет *SoMachine*. *SoMachine* је софтверски пакет

који је произвела фирма *Schneider Electric* за потребе повезивања, програмирања и визуелизације уређаја и процеса који се налазе у систему аутоматског управљања.

Дакле, улаз у управљачки систем представљају сигнали које сензорска техника обезбеђује. ОС_Л и ОС_Д су сигнали који дају информацију о активираниости левог или десног оптичког сензора. Један од сензора биће активиран оног тренутка када млаз флуида пресече његов сноп. Оптички сензори као излаз дају дигитални сигнал који се у PLC контролеру приказује у виду променљивих *I11* и *I13*, односно, то су улазни пинови који даље нису дефинисани а представљају излазе десног (ОС_Д) и левог (ОС_Л) оптичког сензора.

Угао је величина коју даје интегрисани енкодер, који прати положај роторске осовине, резолуције 364.09 импулса/1 степену. Угао заокретања лонца добија се конверзијом сигнала који се добија са серво драјвера преко *CAN_Open* ком уникације са *PLC*-ом, док серво драјвер читава угао са енкодера на серво мотору.

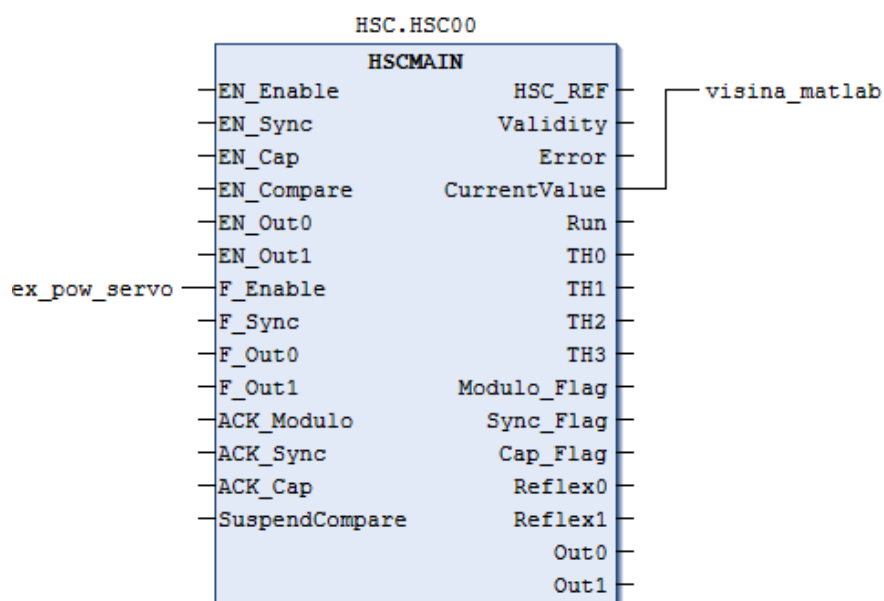


Слика 5.33. Променљива очитаног угла закретања лонца

Функционални блокови за реализацију подпрограма очитавања угла закретања лонца дати су на слици 5.33. Очитана променљива „позиција“ нема повољан облик јер је резолуција очитавања са енкодера 131000 импулса па је стога неопходно довести је у потребан облик конверзијом у другом блоку. Други блок преводи на основу пужног механизма импулс енкодера у угао који је реалан број па се трећим блоком тај проблем решава конверзијом у реч погодну за даље коришћење.

Висина је величина коју читава ултразвучни сензор, и представља растојање између сензора и нивоа флуида у уливној чаши. На слици 5.34. дат је приказ функционалног

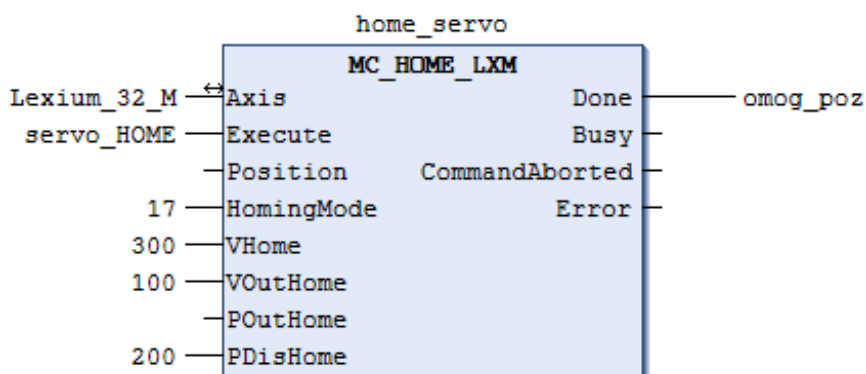
блока помоћу кога се поменута величина очитава на PLC контролеру. Та вредност се на улазу у фази/неуро фази регулатор одузима од референтне вредности, и на тај начин се формира први улаз - одступање.



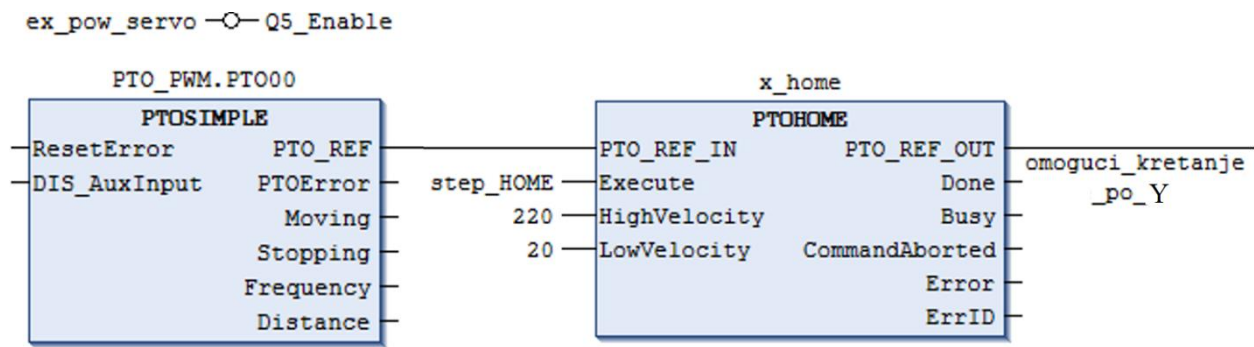
Слика 5.34. Функционални блок очитавања висине

Информацију о маси пружа мерна ћелија која се налази испод калупа. Мерна ћелија садржи контролер којим се калибрише вредност масе при којој треба дати дигитални сигнал погодан за PLC. У овом случају се тај дигитални сигнал доводи на улаз I12 који је дефинисан као променљива „вага_за_калуп“, односно: $vaga_za_kalup := I12$.

На самом почетку процеса систем се налази у HOME положају (HOME_SERVO, HOME_STEPP), из кога се позиционира у место одакле започиње процес ливења. Homing представља основно позиционирање машине и на основу те позиције као референтне тачке извршавају се даља кретања. На сликама 5.35. и 5.36. дати су прикази функционалних блокова за Homing серво и корачног мотора.



Слика 5.35. Функционални блок homing – а серво мотора



Слика 5.36. Функционални блок *homing* – а корачног мотора

Из *home* положаја систем се позиционира у место из кога започиње процес ливења. Померање система по Y осе одвија се за извештан број импулса дефинисаних унутар корачног драјвера. У овом случају то је 6000 импулса.

```
IF ((f1=FALSE AND start_ulivanja = TRUE) OR izvrseno_vracanje_u_0 = TRUE)
THEN distanca_po_Y :=6000; kreni_po_Y_plus:=TRUE; f1:=TRUE;
smer_Y_plus:=PTO_NEGATIVE;
END_IF
```

Након позиционирања започиње процес пуњења калупа заснован на реализацији блокова “FUZZY РЕГУЛАТОР“, “ОС Л“ и “ОС Д“, из алгоритма са слике 5.32., све до тренутка достизања жељене масе калупа или потпуног пражњења ливачког лонца (угао>100). Да би пројектовани фази и неуро фази регулатор био имплементиран у програмски код употребљив за PLC контролер, неопходно је извршити дефазификацију. Дефазификацијом се добија матрична форма која описује генерисану површину управљања са слике 5.29. односно 5.31, и даје експлицитне вредности излаза из регулатора за одговарајућу комбинацију вредности улазних величина.

Табела 5.17. Матрична форма излаза фази/неуро фази регулатора

Угао			
Одступање	α_1	...	α_{71}
Δ_1	$n_{1,1}$...	$n_{1,71}$
...
Δ_{71}	$n_{71,1}$...	$n_{71,71}$

Што се тиче самог приступа у реализацији програмског решења унутар *PLC* контролера, он се састојао од креирања три глобалне променљиве (чиме је омогућено њихово коришћење у другим подпрограмима), које представљају угао закретања лонца (α), одступање (Δ) од референтног нивоа течности у уливној чаши (улазне променљиве) и брзину (n) закретања лонца (излазна променљива).

VAR_GLOBAL

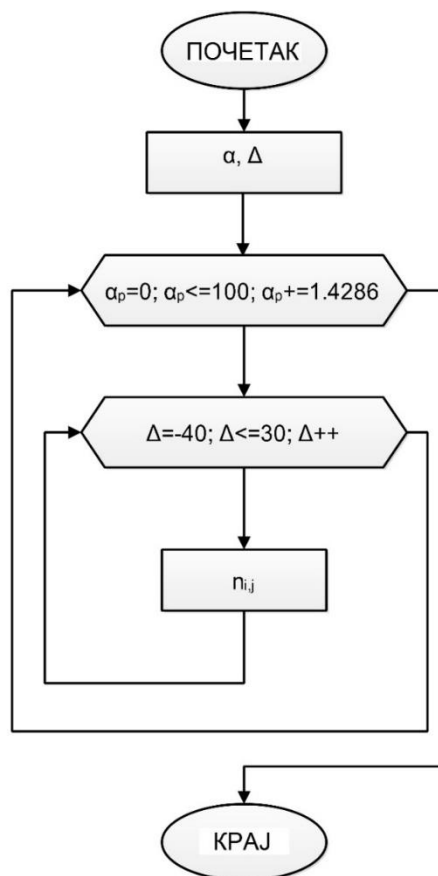
odstupanje: DINT;

brzina_zakretanja: LREAL;

ugao_zakretanja: LREAL;

END_VAR

Матрица је формата 71×71 , и имплементирана је у *PLC* контролер по алгоритму приказаном на слици 5.37.



Слика 5.37. Алгоритам имплементације фази регулатора у *PLC* контролер

Најпре је извршено постављање *IF* инструкције, у којој је као услов постављена променљива која указује на угао закретања лонца, тачније променљива *ugao_zakretanja*. Након тога је коришћена *CASE* инструкција, у којој је као аргумент коришћена променљива која указује на одступање у читавању нивоа течности у уливној чаши,

односно променљива *odstupanje*, при чему свака појединачна вредност променљиве *odstupanje* има уређен пар у виду променљиве која указује на брзину закретања лонца *brzina_zakretanja*.

IF(ugao_zakretanja =0)

THEN

CASE odstupanje OF

-

40:brzina_zakretanja:=177.6072;

-

39:brzina_zakretanja:=177.6072;

-

38:brzina_zakretanja:=177.6072;

-

37:brzina_zakretanja:=177.6072;

-

36:brzina_zakretanja:=177.6072;

-

35:brzina_zakretanja:=177.6072;

...

28:brzina_zakretanja:=40.0

139;

29:brzina_zakretanja:=40.0

139;

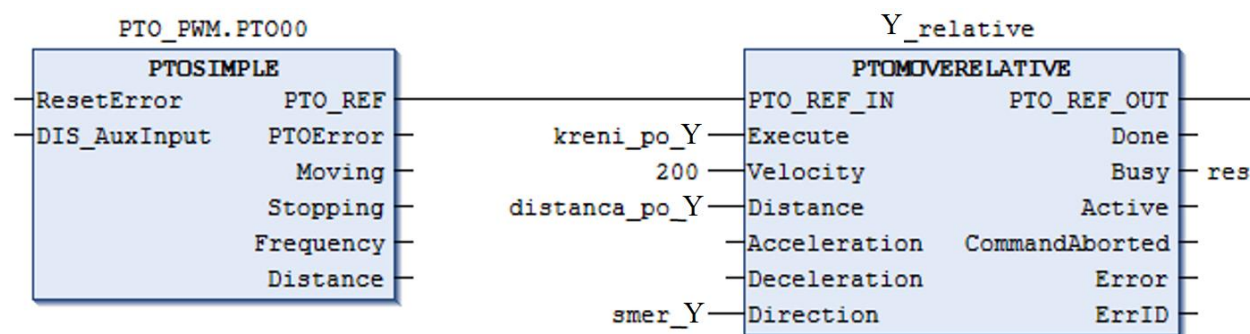
30:brzina_zakretanja:=40.0

139;

END_CASE;

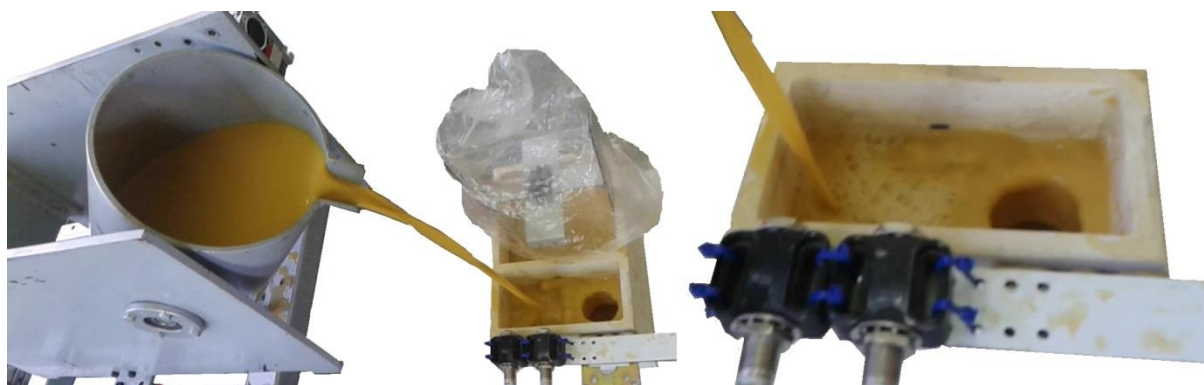
END_IF;

Паралелно са реализацијом сегмента управљања заснованог на фази регулатору, одвија се и прецизно позиционирање млаза. Током уливања, како би се регулисало центрирање млаза, користи се информација са два оптичка сензора П11 и П13, који при детектовању млаза активирају корачни мотор и тиме се врши померај по Y-оси за одређену вредност, како би се спречило просипање. Функционални блок овог подпрограма дат је на слици 5.38.



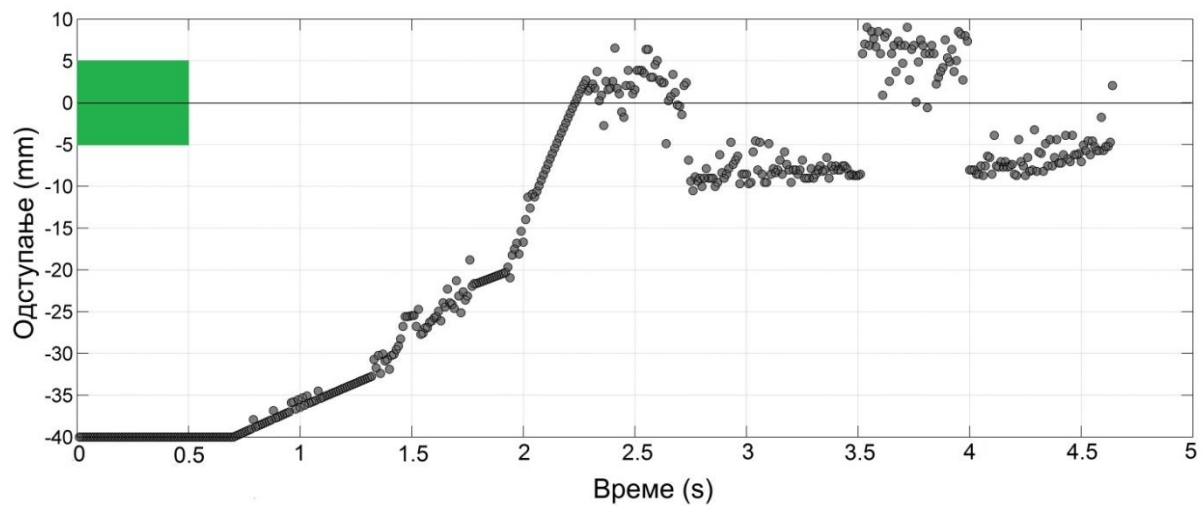
Слика 5.38. Функционални блок за прецизно позиционирање млаза

Након достизања жељене масе калупа, процес ливења се зауставља, лонац остаје у тренутној позицији. Након доласка следећег калупа на линију, процес се наставља, све до тренутка потпуног пражњења лонца ($\text{угао} > 100$). На слици 5.39. дат је приказ једне од многобројних експерименталних симулација, током развоја управљања које је задовољило постављени циљ.

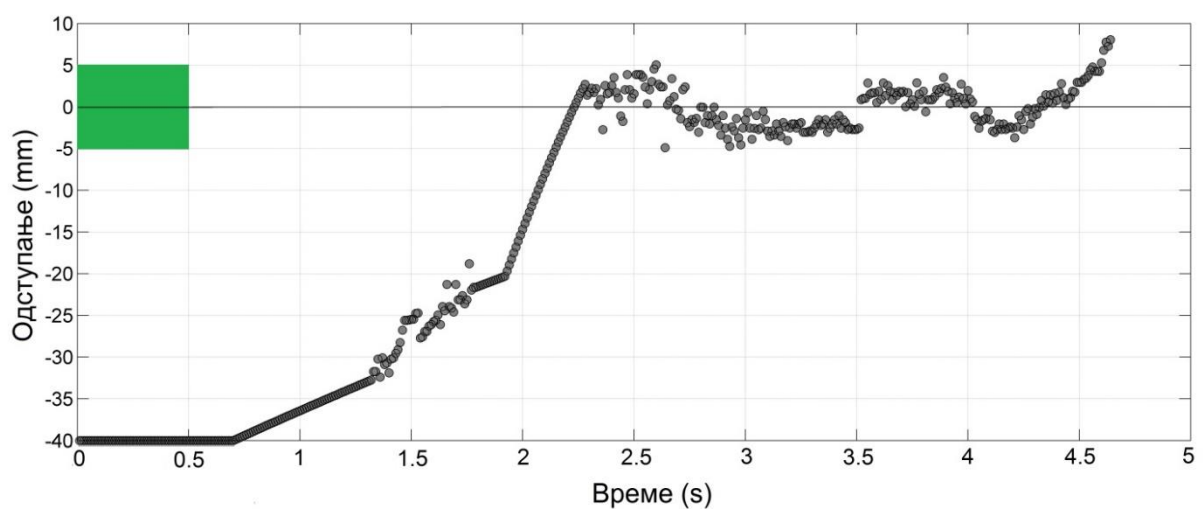


Слика 5.39. Симулација процеса пуњења калупа на експерименталној лабораторијској поставци

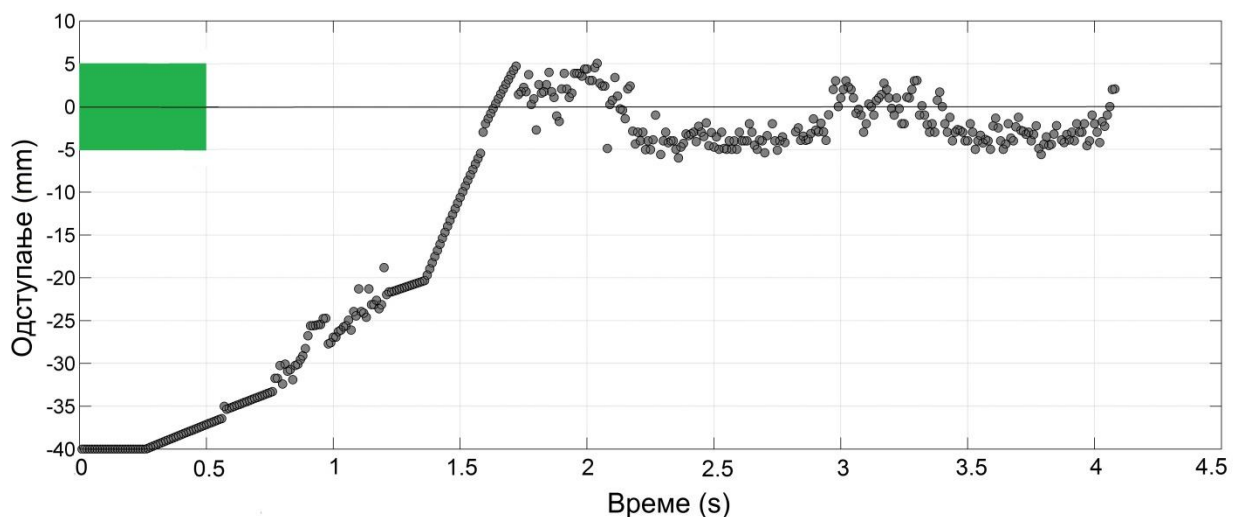
Ефикасност развијеног интелигентног фази система управљања и неуро фази система управљања, верификована је упоредном анализом са произвољним ручним пуњењем калупа. На сликама 5.40, 5.41. и 5.42. дат је приказ мануелног, фази и неуро фази пуњења калупа, на примеру једног од реализованих експерименталних пуњења калупа.



Слика 5.40. Мануелно управљање процесом



Слика 5.41. Фази управљање процесом



Слика 5.42. Неуро фази управљање процесом

Ручно пуњење калупа је категорија која представља на својеврстан начин производну вештину у ливници, јер искључиво зависи од искуства и умешности производног радника. Аутоматско пуњење калупа, засновано на интелигентном управљању, обезбеђује

конзистентност процеса, прецизно пуњење калуца, као и уштеду времена и материјала. Зелено поље означава дозвољена одступања од референтне вредности нивоа у уливној чаши. Фази и неуро фази управљање обезбеђује значајно боље резултате од мануелног управљања, када је ниво прецизности реализације процеса у питању, а наравно, додатни бенефит је чињеница да искључује утицај човека током сипања и његов ближи контакт са материјалом високе температуре. Фази управљање је показало веома добре резултате ако се узме у обзир сложеност процеса дефинисања атрибута, функција припадности, њихових параметара и одговарајућих правила. Неуро фази управљање је у поређењу са фази управљањем дало боље резултате у погледу трајања процеса пуњења. Наиме, сам почетак сипања је бржи што смањује укупно време пуњења капула за око 0.5s. Неуро фази управљање показало је већу стабилност, и могућност да уз још адекватнији сет података, у смислу прецизности интерпретације процеса, произведе још квалитетнију управљачку функцију.

Глава 6.

ЗАКЉУЧАК

6.1. ДИСКУСИЈА И ЗАКЉУЧЦИ

Истраживачки циљ докторске дисертације садржан у потврди хипотезе да је активности у производним процесима ливења могуће унапредити техникама рачунарске интелигенције, остварен је кроз систематску презентацију моделирања, оптимизације и управљања процесима у ливници, заснованим на техникама рачунарске интелигенције.

На примеру моделирања процеса добијања белог ливеног гвожђа представљена је употреба ВНМ у моделирању процеса топљења. Резултат експерименталних активности, садржан у сету од 120 података (120 шаржи узетих у разматрање) коришћен је у изградњи више различитих вештачких неуронских мрежа (ВНМ). Њихова различитост огледала се у архитектури мрежа, броју скривених слојева и неурона у њима. Упоредна анализа крених модела избацила је у први план онај модел ВНМ који је имао најбоље перформансе изражене кроз максималну и средњу грешку у фази тестирања. Резултати тестирања су показали да се неуро мрежа ВНМ 12–16–12–4 може успешно применити при дефинисању потребне количине чистог метала у фази легирања, да се добије жељени коначни хемијски састав белог ливеног гвожђа. Други део истраживања могућности моделирања процеса топљења метала заправо је својеврсна интеграција два производна процеса међусобно повезана. Први део овог истраживања дао је својеврсну потврду о могућности примене ВНМ у процесу моделирања топљења метала и представљао основ за хибридную неуро - генетску интеграцију производних процеса млевења руде бакра и

израде флотацијских кугли за млевење руде бакра. Овај део истраживања састојао се из три етапе, тако да је у првој моделиран процес млевења руде бакра употребом ВНМ. Циљ прве етапе је био успостављање корелације између механичко - хемијских карактеристика флотацијских кугли од белог ливеног гвожђа, са једне и хабања кугли са друге стране. Креирано је неколико различитих архитектура ВНМ, а она са најбољим перформансама (најмањом максималном и средњом грешком), конкретно ВНМ 5 – 5 – 1 коришћена је у наредној, другој, етапи као функција циља за генетску оптимизацију. Наиме, у другој фази су, употребом генетског алгоритма (ГА) пронађене оне механичко хемијске карактеристике кугли за које је хабање флотацијских кугли минимално. Те вредности су у трећој фази представљале референтне вредности, тј. оне карактеристике које кугла треба да поседује након израде. Хемијским саставом се директно диригује кроз фазу легирања, па је у складу са тим реализована идеја у трећој фази развоја интелигентног софтверског сензора. Интелигентни софтверски сензор је ВНМ којој се на улазу у симулационој фази доводе оне вредности легирајућих елемената за које су на излазу минимална одступања од референтних вредности добијених генетском оптимизацијом. И у овом случају креирано је неколико различитих архитектура, а она са најбољим перформансама добила је епитет интелигентног софтверског сензора, а то је ВНМ 12–16–12–4. Општи закључак након овог истраживања је да се ВНМ могу веома успешно користити у моделирању процеса топљења метала. Њихова способност да савладају сложену природу интеракције између процесних варијабли, као што су топлотни губитак и динамика нелинеарних хемијских реакција је изузетна и лако уочљива приликом креирања различитих модела ВНМ.

Реализација оптимизационих процеса заснованих на техникама рачунарске интелигенције у ливницама, представљена је на оптимизацији геометрије система ливења носача зуба багера у песку. Систем ливења обухвата уливни систем и систем храњења одливка. Кроз истраживање је на систематичан начин изложена методологија избора уливног система, функционалност њему припадајућих елемената, као и геометрија елемената који су предмет оптимизације. Предмет оптимизације били су висина ливења и димензије уливника, са циљем да се максимизује пуњење калуца, тј. минимизира време пуњења калуца. Уз поштовање одговарајућих ограничења, дефинисаних Рејнолдсовим бројем и модулом уливника, спроведени су оптимизациони процеси применом генетског алгоритма и оптимизације ројем честица. Спроведене оптимизације дале су резултат на бази кога је димензионисан целокупан уливни систем користећи се препорукама најеминентнијих литературних извора из области ливарства. На бази оптимизованих димензија формиран су *CAD* модели сваког елемента уливног система понаособ, као и склоп целокупног уливног система. Такође је, кроз истраживање, представљен феномен

скупљања материјала током процеса хлађења, као и потреба за храњењем одливка током поменутог процеса. Изложена је методологија избора система храњења, његове позиционе карактеристике дејства, као и геометрија хранитеља, која је и предмет оптимизационог процеса овог дела истраживања. Наиме предмет оптимизације били су пречник и висина хранитеља, а на бази резулата оптимизације креирани су *CAD* модели припадајућих елемената система храњења, тј. хранитеља. Интегрисањем *CAD* модела два оптимизована система, уливног система и система храњења, добијен је склоп целокупног система ливења. Употребом савременог софтверског система *MAGMASOFT*⁵ извршена је нумеричка симулација, која је потврдила исправност спроведене оптимизације уливног система и система храњења и, на тај начин, дала зелено светло индустријској имплементацији оптимизацијом предложеног система. Општи закључак након овог дела истраживања је да комбинација техника рачунарске интелигенције и савремених *CAD/CAM* софтверских система доноси велику корист у процесима конструисања система ливења у ливницама. Та корист је вишеструка са аспекта ефикасности и економичности, ако се узме у обзир да су се процеси конструисања система ливења заснивали, а, у неким ливницама, још увек заснивају на принципу “пробе и грешке”. А као посебан бенефит овог дела истраживања намеће се оптимизација система ливења делова комплексне геометрије, као и приступ минимизацији времена пуњења калуца комплексне геометрије.

Управљање процесима у ливницама представљено је кроз излагање идеје аутоматизованог погона у ливници. За разлику од неких других индустријских процеса, многе ливнице нису имале користи од напредне аутоматизације, те се процес пуњења калуца још увек одвија ручно. У овом делу истраживања развијен је лабораторијски симулатор ливења који је коришћен као експериментална опрема у поменутом истраживању. Његове функције су приближене реално остварљивом индустријском аутоматизованом погону. Основни циљ управљања, поред побољшања услова рада за производне раднике, је и прецизно пуњење калуца. Појам прецизно пуњење калуца је дефинисан са три кључне тачке током процеса. Прва је прецизно падање млаза у уливну чашу, друга је одржавање константног нивоа истопљеног метала у чаши и, коначно, трећа је елиминисање преливања истопљеног метала из калуца. Развој управљачког система заснован је на примени интелигентног управљања као методологије, тј. превасходно на примени фази управљања и неуро-фази система из домена вештачке интелигенције. Ефикасност развијеног интелигентног система управљања, фази и неуро фази, верификована је упоредном анализом са произвољним ручним пуњењем калуца. Аутоматско пуњење калуца, засновано на интелигентном управљању, обезбеђује конзистентност процеса, прецизно пуњење калуца, као и уштеду времена и материјала.

На основу резултата приказаних у дисертацији, може се закључити да примена техника рачунарске интелигенције може унапредити производне процесе у ливницама по више основа. Изведена моделирања и оптимизације, као два од три истраживачка правца у дисертацији, потврдила су своју ваљаност и применљивост техника на којима се заснивају у индустријским условима. Реализовано управљање, као трећи истраживачки правац, показало је кроз експерименталну лабораторијску реализацију велики потенцијал могуће примене и у индустријским условима.

6.2. ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА

Правци даљег истраживања могу обухватити проширење развијених методологија на друге топионичке процесе и производњу других легура за технолошке процесе ливења. Искуства стечена на развијању модела за добијање белог ливеног гвожђа могу послужити као стабилна и вредна основа за постављање нових истраживачких циљева у области. Такође искуство стечено интелигентном интеграцијом два међусобно повезана производна процеса, може се користити као идеја за интеграцију других међусобно повезаних производних процеса.

Правци даљег истраживања могу обухватити проширење методологије оптимизације система ливења, кога чине уливни систем и систем храњења, са становишта примене нових оптимизационих алгоритама, као и других објеката оптимизације као делова система ливења. Како се методологија показала веома успешно на примеру носача зуба багера, који је део комплексне геометрије, то ће сваки нови одливак сложене геометрије сам по себи представљати нови истраживачки изазов.

Потпуна имплементација предложеног аутоматизованог система у погон ливнице представљаће сложен истраживачки изазов и коначан циљ у будућим истраживањима. Такође, даља истраживања ће ићи у смеру проналажења што боље управљачке функције, засноване на интелигентним системима управљања.

6.3. ПРЕГЛЕД ОРГИНАЛНИХ ДОПРИНОСА

Доприноси ове тезе огледају се у развоју неколико методологија које унапређују производне процесе у ливницама у неколико аспеката, а засноване су на техникама рачунарске интелигенције. Поред примене техника рачунарске интелигенције у развоју методологија које унапређују процесе у ливницама, допринос ове тезе огледа се и у представљању примене *CAD/CAM* софтверских решења у решавању реалних индустријских проблема, кроз рачунаром подржано пројектовање и нумеричку симулацију.

Наиме, у оквиру тезе представљени су следећи доприноси:

- Формулисана је методологија развоја вештачке неуронске мреже, као поузданог модела, који представља процес флотације руде бакра. Резултат развијене методологије је модел предикције хабања флотацијских кугли у функцији хемијско механичких особина истих, током процеса мљења руде.
- Формулисана је методологија развоја вештачке неуронске мреже, као поузданог модела топљења белог ливеног гвожђа. Резултат развијене методологије је модел процеса топљења белог ливеног гвожђа, који омогућује управљање процесом легирања током производног процеса добијања белог ливеног гвожђа.
- Предложена је хибридна комбинација вештачких неуронских мрежа и генетских алгоритама у повезивању два повезана производна процеса. Модел једног производног процеса предстаља функцију циља, која се минимизује да би била употребљена у моделирању другог производног процеса.
- Презентовано је пројектовање и оптимизација уливног система за процес ливења носача зуба багера у песку. Комбинација *CAD* софтвера и оптимизационих техника, као што су генетски алгоритми и оптимизација ројем честица, као резултат даје оптимално решење уливног система.
- Презентовано је пројектовање и оптимизација система храњења одливка, за процес ливења носача зуба багера у песку. Комбинација *CAD* софтвера и оптимизационих техника, као што су генетски алгоритми и оптимизација ројем честица, као резултат даје оптимално решење система храњења одливка.
- Изведене су нумеричке симулације процеса ливења, употребом савременог *CAM* софтверског система, као верификација исправности оптимизованог и пројектованог система ливења носача зуба багера.
- Развијено је, конструисано и изведено лабораторијско ливачко постројење, односно лабораторијски симулатор ливења са два степена слободе.
- Формулисана је методологија развоја интелигентног управљања процесом ливења, заснованог на фази и неуро-фази системима.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Petrović, P., *Industrijski sistemi Srbije (IV)*, Industrija, 2012.
- [2] Jianxin, Z., Xiaoyuan, J., Dunming, L., Bifeng, G., Bihong, G., Shengyang, P., Tang Hongtao, T., *Research and application of enterprise resource planning system for foundry enterprises*. China foundry, 10 (1), 2013.
- [3] *Referentni dokument koji se odnosi na livnice i kovačnice (BREF - Best Available Technique Reference Notes), odnosi se na razmenu informacija iz člana 16 (2) Direktive Saveta 96/61/EC*.
- [4] Jovičić, A., *Unapređenje ključnih indikatora performansi poslovanja u industriji livarstva*. Doktorska disertacija, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, 2015.
- [5] *"Competitive Assessment of the U.S. Foundry Industry"*, USITC Publication 1582, U.S. Department of Commerce, 1984.
- [6] *Metalcasting and Molding Processes*, American Foundrymen's Society, 1981.
- [7] Bauer, B., Mihalić, I., *Osnove tehnologije lijevanja*. Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2012.
- [8] Kalogirou, A. S., *Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review*. Progress in Energy and Combustion Science, 29 (6), 2003.
- [9] Miljković, Z., *Sistemi veštačkih neuronskih mreža u proizvodnim tehnologijama*. Naučna monografija nacionalnog značaja, Serija monograf. dela Inteligentni tehnološki sistemi (Urednik serije: Prof. dr Vladimir Milačić), Knjiga 8, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, 2003.
- [10] Miljić, N., *Istraživanje optimalnog upravljanja sistemom paljenja oto – motora primenom veštačkih neuronskih mreža*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Beogradu, 2012.
- [11] Zaina, M. A., Harona, H., Sharif, S., *Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Networ*. Expert Systems with Applications, 37 (2), 2010.
- [12] D'Addona, M. D., Teti, R., *Genetic Algorithm-based Optimization of Cutting Parameters in Turning Processes*. Procedia CIRP, 7, 2013.
- [13] Ezugwua, E. O., Fadarea, D. A., Bonneya, J., Da Silvaa, R. B., Sales, W. F., *Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45 (12-13), 2005.
- [14] Deepan Bharathi Kannan, T., Rajesh Kannan, G., Suresh Kumar, B., Baskar, N., *Application of Artificial Neural Network Modeling for Machining Parameters Optimization in Drilling Operation*. Procedia Materials Science, 5, 2014.
- [15] Kim, D., Jeon, D., *Fuzzy-logic control of cutting forces in CNC milling processes using motor currents as indirect force sensors*. Precision Engineering, 35, 2011.

- [16] Saravanan, R., Asokan, P., Sachidanandam, M., *A multi-objective genetic algorithm (GA) approach for optimization of surface grinding operations*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42 (12), 2002.
- [17] Dweiria, F., Al-Jarrahb, M., Al-Wedyan, H., *Fuzzy surface roughness modeling of CNC down milling of Aluminic-79*. Journal of Materials Processing Technology, 133 (3), 2003.
- [18] Srinivasu, D. S., Ramesh Babu, N., *A neuro-genetic approach for selection of process parameters in abrasive waterjet cutting considering variation in diameter of focusing nozzle*. Applied Soft Computing, 8 (1), 2008.
- [19] Vundavilli, R., P., Parappagoudar, M.B., Kodali, S.P., Surekha Benguluri, *Fuzzy logic-based expert system for prediction of depth of cut in abrasive water jet machining process*, Knowledge-Based Systems, 27, 2012.
- [20] Noaman, M., N., Mohammad AL-Khalidy, M., M., Mahmood Al-Rawi, Y., O., *Beam delivery design for laser cutting system using neuro - fuzzy logic controller*, Gulf University Journal, 5 (1), 2013.
- [21] Jain, N. K., Jain, V. K., *Optimization of electrochemical machining process parameters using genetic algorithms*, Journal Machining Science and Technology, 11 (2), 2007.
- [22] Klancnik, S., Begic-Hajdarevic, D., Paulic, M., Ficko, M., Cekic, A., Husic, C., M., *Prediction of Laser Cut Quality for Tungsten Alloy Using the Neural Network Method*. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 61, 2015.
- [23] Fernández, M. M. J., Álvarez Cabal, V., Rodríguez Montequin, V., Villanueva Balsera, J., *Online estimation of electric arc furnace tap temperature by using fuzzy neural network.*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 21 (7), 2008.
- [24] Thomas, P., Bloch, G., Sirou, F., Eustache, V., *Neural Modeling of an Induction Furnace Using Robust Learning Criteria*. Integrated Computer-Aided Engineering, 6 (1), 1999.
- [25] Das, A., Maiti, J., Banerjee, R. N., *Process control strategies for a steel making furnace using ANN with bayesian regularization and ANFIS*. Expert Systems with Applications 37 (2), 2010.
- [26] Bouhouche, S., Boucherit, M., S., Lahreche, M., Bast, J., *Modeling of ladle modeling of ladle metallurgical treatment using neural network*. The Arabian Journal for Science and Engineering, 29, 2004.
- [27] Santosa, C. A., Spimb, J. A., Garcia, A., *Mathematical modeling and optimization strategies (genetic algorithm and knowledge base) applied to the continuous casting of steel*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 16 (5-6), 2003.

- [28] Vijian, P., Arunachalam, V. P., *Modelling and multi objective optimization of LM24 aluminium alloy squeeze cast process parameters using genetic algorithm*. Journal of Materials Processing Technology, 186 (1–3), 2007.
- [29] Zhang, L., Li, L., Wang, S., Zhu, B., *Optimization of LPDC Process Parameters Using the Combination of Artificial Neural Network and Genetic Algorithm Method*. Journal of Materials Engineering and Performance, 21 (4), 2012.
- [30] Mousavi Anijdan, S. H., Bahrami, A., Madaah Hosseini, R. H., Shafyei, A., *Using genetic algorithm and artificial neural network analyses to design an Al–Si casting alloy of minimum porosity*. Materials and Design, 27 (7), 2006.
- [31] Shabania, O. M., Mazahery, A., *The ANN application in FEM modeling of mechanical properties of Al–Si alloy*. Applied Mathematical Modelling, 35 (12), 2011.
- [32] Zheng, J., Wang, Q., Zhao, P., Wu, C., *Optimization of high-pressure die-casting process parameters using artificial neural network*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44 (7), 2009.
- [33] Singha, K. S., Singh, J. S., *Analysis and optimization of sand casting defects with the help of artificial neural network*. International Journal of Research in Engineering and Technology, 4 (5), 2015.
- [34] Jakubski, J., Dobosz, M. St., *Selected parameters of moulding sands for designing quality control systems*. Archives of foundry engineering, 10 (3), 2010.
- [35] Benny Karunakar, D., Datta, G. L., *Prevention of defects in castings using back propagation neural networks*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 39 (11), 2008.
- [36] Priyank, V., Parekh, J., Vadher, A., *Optimization of Green Sand Casting Process Parameters by Artificial Neural Network*. Trends in Mechanical Engineering & Technology, 6 (2), 2016.
- [37] Parappagoudar, M. B., Pratihari, D., K., Datta, G., L., *Forward and reverse mappings in green sand mould system using neural networks*. Applied Soft Computing, 8 (1), 2008.
- [38] Gong, X., Liao, D., Chen, T., Zhou, J., Yin, Y., *Optimization of steel casting feeding system based on BP neural network and genetic algorithm*. China Foundry, 13 (3), 2016.
- [39] Lagdive, P. B., Inamdar, K., H., *Optimization of Riser in Casting Using Genetic Algorithm*. International Archive of Applied Sciences and Technology, 4 (2), 2013.
- [40] Nimbalkara, L. S., Dalu, S. R., *Design optimization of gating and feeding system through simulation technique for sand casting of wear plate*. Perspectives in Science, Available online 1 April 2016.

- [41] Jie, Z., Dongqi, Z., Pengwei, W., Gang, W., Feng, L., Penglong, D., *Numerical Simulation Research of Investment Casting for TiB₂/A356 Aluminum Base Composite*. Rare Metal Materials and Engineering, 43 (1), 2014.
- [42] Dabade, A. U., Bhedasgaonkar, C., R., *Casting Defect Analysis using Design of Experiments (DoE) and Computer Aided Casting Simulation Technique*, *Procedia CIRP*, 7 2013.
- [43] Jacob, E., Sasikumar, R., Praveen, B., Gopalakrishna, V., *Intelligent design of feeders for castings by augmenting CAD with genetic algorithms*. Journal of Intelligent Manufacturing, 15 (3), 2004.
- [44] Susac, F., Banu, M., Epureanu, A., *Artificial Neural Network Applied to Thermomechanical Fields Monitoring during Casting*. Proceedings of the 11th WSEAS Int. Conf. on Mathematical methods, Computational Techniques and intelligent system, Spain, 2009.
- [45] Vosniakosa, G.-C., Galiotou, V., Pantelisb, D., Benardosa, P., Pavlou, P., *The scope of artificial neural network metamodels for precision casting process planning*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 25 (6), 2009.
- [46] Krimpenis, A., Benardos, P. G., Vosniakos, G.-C., Koukouvitaki, A., *Simulation-based selection of optimum pressure die-casting process parameters using neural nets and genetic algorithms*. Int J Adv Manuf Technol, 27 (5), 2006.
- [47] Weixiong, Y, Yi, Y., Bin, Z., *Novel methodology for casting process optimization using Gaussian process regression and genetic algorithm*. CHINA FOUNDRY, 6 (3), 2009.
- [48] Gravela, M., Priceb, L., W., Gagné, C., *Scheduling continuous casting of aluminum using a multiple objective ant colony optimization metaheuristic*. European Journal of Operational Research, 143 (1), 2002.
- [49] Surekha, B., Kaushik, K., L., Panduy, K., A., Vundavilli, R., P., Parappagoudar, B. M., *Multi-objective optimization of green sand mould system using evolutionary algorithms*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 58 (1), 2012.
- [50] Mugwagwa, L., Nyanga, L., Mhlanga, S., *Design of a fuzzy controller for the continuous casting process*. International Journal of Engineering Science and Technology, 5 (1), 2013.
- [51] Mauder, T., Sandera, C., Stetina, J., *Optimal Control Algorithm for Continuous Casting Process by Using Fuzzy Logic*. Steel research international, 86 (7), 2015.
- [52] Yang, T., Chen, X., Hu, H., Chu, Y., Cheng, P., *A fuzzy PID thermal control system for casting dies*. Journal of Intelligent Manufacturing, 19 (4), 2008.
- [53] Qiang, L., Qiang, H., Wanqi, J., *Pressurization control system for low pressure crucible casting*. China foundry, 8 (4), 2011.

- [54] Terashima, K., *Recent Automatic Pouring and Transfer Systems in Foundries*. Materials Process Technology, 39 (6), 1988.
- [55] Lindsay, W., *Automatic Pouring and Metal Distribution Systems*. Foundry Trade Journal, 10, 1983.
- [56] Thielk, J., *Using Electric Furnaces to Store and Pour Treated Ductile Iron Part 2*. Modern Casting, 77 (11), 1987.
- [57] Watanabe, J., Yoshida, K., *Automatic Pouring Equipment for Casting "Mel Pore System"*. Industrial Heating, 29 (4), 1992.
- [58] Sugimoto, Y., Yano, K., Terashima, K., *Liquid level control of automatic pouring robot by two-degrees of freedom control*. Proceedings of the 15th IFAC World Congress, Barcelona, 2002.
- [59] Yoshiyuki, N., Yano, K., Terashima, K., *Control of self-transfer-type automatic pouring robot with cylindrical ladle*. Proceedings of the 16th IFAC World Congress, Prague, 2005.
- [60] Noda, Y., Terashima, K., *Modeling and Flow Rate Control of Automatic Pouring System*. Journal of Robotics and Mechatronics, 19 (2), 2007.
- [61] Yano, K., Terashima, K., *Supervisory control of automatic pouring machine*. Control Engineering Practice, 18 (3), 2010.
- [62] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., Williams, R. J., *Learning representation by back – propagation errors*. Nature, 323, 1986.
- [63] Bašić, D. B., Čupić, M., Šnajder, J., *Umjetne neuronske mreže*. Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2008.
- [64] Ranković, V., *Inteligentno upravljanje*. Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2008.
- [65] Hagan, T. M., Demuth, B. H., Beale, H. M., De Jesús, O., *Neural Network Design*. 2nd Edition, Martin Hagan, 2014.
- [66] Haykin, S. S., *Neural networks – A Comprehensive Foundation*. Macmillan, 1994.
- [67] Van der Smagt, P., Krose, P., *An introduction to Neural Networks*. 8th Edition, The University of Amsterdam, 1993.
- [68] Godjevac, J., *A method for the design of neuro – fuzzy controllers, an application in robot learning*. Doctoral dissertation, EPEF, Lausanne, Switzerland, 1997.
- [69] Stojiljković, S., *Primena neuro – fazi – genetskog upravljanja na automatizaciju sistema grejanja i klimatizacije u inteligentnim zgradama*. Magistarski rad, Mašinski fakultet u Nišu, 2014.
- [70] Golub, M., *Genetski algoritmi – prvi deo*. Sveučilište u Zagrebu, 2010.
- [71] Holland, J. H., *Adaptation in natural and artificial systems*. MI: University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

- [72] De Jong, K., *Adaptive system design: A genetic approach*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 10 (9), 1980.
- [73] De Jong, K., *Genetic algorithms: A 10-year perspective*. Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, Pittsburgh, PA: Lawrence Erlbaum, 1985.
- [74] De Jong, K., *Learning with Genetic Algorithms: An Overview*. Machine Learning, 3 (2-3), 1988.
- [75] Goldberg, E. D., *Genetic Algorithms*. Pearson Education, 2006.
- [76] Mitrović-Varga, Z., *Metaheuristike*. Master rad, Matematički fakultet u Beogradu, 2008.
- [77] Domović, D., *Optimizacija rojem čestica*. Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, 2008.
- [78] Clerc, M., *Particle Swarm Optimization*. John Wiley & Sons, 2010.
- [79] Bugarski, V., *Ekspertski sistem za upravljanje brodskom prevodnicom zasnovan na računarskoj inteligenciji*. Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, 2015.
- [80] McCaffrey, J., *Artificial Intelligence: Particle Swarm Optimization*. MSDN Magazine - The Microsoft Journal for Developers, 2011.
- [81] Zadeh, L. A., *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi A. Zadeh*. River Edge, NJ, USA: World Scientific Publishing Co., Inc., 1996.
- [82] Altrock, C. V., *Fuzzy Logic and Neuro Fuzzy Applications Explained*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall; Pap/Dis edition, 1995.
- [83] Mamdani, E. H., *Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant*. In Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 121 (12), 1974.
- [84] Mamdani, E. H., Assilian, S. *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*. International Journal of Man-Machine Studies, 7 (1), 1975.
- [85] Takagi, T., Sugeno, M., *Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control*. Systems. Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, 1, 1985.
- [86] Sugeno, M., Kang, G. T., *Structure identification of fuzzy model*. Fuzzy sets and systems, 28 (1), 1988.
- [87] Tsukamoto, Y., *An approach to fuzzy reasoning method*. Advances in fuzzy set theory and applications, 1979.
- [88] Jantzen, J., *Foundations of Fuzzy Control: A Practical Approach, 2nd Edition*. John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
- [89] Feng, G., *A Survey on Analysis and Design of Model-Based Fuzzy Control Systems*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 14 (5), 2006.

- [90] Babuska, P., Mamdani, E., *Fuzzy control*. Scholarpedia, 3 (2), 2008.
- [91] Lee, C. C., *Fuzzy logic in control system: Fuzzy logic controller, Part I*. IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics, 20 (2), 1990.
- [92] Tanaka K., Wang, H. O., *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [93] Yager, R. R., Filev, D. P., *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [94] Jantzen, J., *Design of Fuzzy Controllers*. Technical University of Denmark, Department of Automation, Bldg 326, DK-2800 Lyngby, Denmark, 1998.
- [95] Mamdani, E. H., *Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers*. International Journal of Man-Machine Studies, 8 (6), 1976.
- [96] Nauck, D., *Neuro-fuzzy systems: review and prospects*. In Proceedings of Fifth European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing (EUFIT'97), 1997.
- [97] Abraham, A., *Adaptation of fuzzy inference system using neural learning*. In Fuzzy Systems Engineering, Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [98] Jang, J. S., *ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system*. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, 23 (3), 1993.
- [99] Shoorehdeli, M. A., Teshnehlab, M., Sedigh, A. K., & Khanesar, M. A., *Identification using ANFIS with intelligent hybrid stable learning algorithm approaches and stability analysis of training methods*. Applied Soft Computing, 9 (2), 2009.
- [100] Dragović, T. I., *Konzistentan neuro – fazi sistem zaključivanja*. Doktorska disertacija, Fakultet organizacionih nauka u Beogradu, 2016.
- [101] Jang, J. S. R., Sun, C. T., Mizutani, E. *Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
- [102] Rudnev, B., Loveless, D., Cook, L. R., Black, M., *Handbook of Induction Heating*. Marcel Dekker, INC, 2003.
- [103] ASM Handbook Committee, *ASM Metals HandBook*. ASM International, Ohio, 2002.
- [104] Davidović, A., Najdenov, I., Volkov-Husović, T., Raić, K., *Indukciona peć bez jezgra: konstrukcija, radni parametri i primena*. Livarstvo, 48 (2), 2009.
- [105] Dučić, N., Čojbašić, Ž., Slavković, R., *The application of neural network in managing white cast iron production. Proceedings of the 2nd international scientific conference. Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications - COMETA2014, East Sarajevo - Jahorina, 2014.*

- [106] Dučić, N., Čojbašić, Z., Slavković, R., *Floating balls wear rate prediction using back propagation and RBF neural networks*. Proceedings of the 8th International Symposium KOD 2014, Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, Proceedings, Hungary, Balatonfüred, 2014.
- [107] Dučić, N., Čojbašić, Ž., Slavković, R., Jordović, B., Purenović, J., *Optimization of chemical composition in the manufacturing process of flotation balls based on intelligent soft sensing*. Hemijska industrija, 2015, OnLine-First (00):68-68, DOI: 10.2298/HEMIND150715068D
- [108] Slavković, R., Arsovski, S., Veg, A., Jugović, Z., Jovicic, A., Dučić, N., *Casting Process Optimization by the Regression Analysis Applied on the Wear Resistant Parts Molding*. TECHNICAL GAZETTE, 19 (1), 2012.
- [109] Paulo Davim, J., *Artificial Intelligence in Manufacturing Research*. NOVA Publisher, 2010.
- [110] Wills, A. B., Napier-Munn, J. T., *Mineral Processing technology*. Elsevier Science & Technology Books, 2006.
- [111] Anišić, Z., *Proizvodne tehnologije II – Tehnologije livenja*. Viša tehnička škola Subotica, 2003.
- [112] *Obuka za livenje u peščanim kalupima*, Projekat EU i Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije, 2011 – 2013.
- [113] Campbell, J., *Complete casting Handbook, 1st Edition*. Elsevier Ltd., 2011.
- [114] American Foundry Society, *Analysis of Casting Defects*. Amer Foundrymens Society, 2002.
- [115] Kotas, P., *Integrated Modeling of Process, Structures and performance in Cast Parts*. Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark - Department of Mechanical Engineering, 2011.
- [116] Larsen, P. *Iron melt flow in thin walled sections cast in vertically parted green sand moulds*. Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, 2004.
- [117] Campbell, J., *Castings*. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003.
- [118] Frederiksson, H., Akerlind, U., *Materials processing during casting*. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [119] Stefanescu, D. M., *Science and engineering of casting solidification, 2ed*. Springer Science + Business Media, LLC, 2009.
- [120] Steel Founders' Society of America, *Feeding & Riserling Guidelines for Steel Castings*. Steel Founders' Society of America, 2001.

- [121] Dučić, N., Čojbašić, Ž., Manasijević, Radiša, R., Slavković, R., Milićević, I., *Optimization of the Gating System for Sand Casting Using Genetic Algorithm*. International journal of metalcasting, First Online: 13 May 2016, DOI: 10.1007/s40962-016-0040-8.
- [122] Dučić, N., Čojbašić, Ž., Radiša, R., Slavković, R., Milićević, I., *CAD/CAM design and the genetic optimization of feeders for sand casting process*. FACTA UNIVERSITATIS Series: Mechanical Engineering, 14 (2), 2016.
- [123] Miltenovic, V., Dučić, N., Slavković, R., Radonjić, S., Bošković, N. *Increase of the operating life of a mould during the casting process of flotation balls with the aid of triz method*. FACTA UNIVERSITATIS Series: Mechanical Engineering, 10 (1), 2012.
- [124] Slavković, R., Jugović, Z., Milićević, I., Popovic, M., Dučić, N., Nedeljkovic, B., *Simulation Methodology as the Basis of CAD/CAM/CAE Design of Dynamically Loaded Castings in Machine Building*. METALURGIA INTERNATIONAL, 17 (4), 2012.
- [125] Rav i, B., *METAL CASTING: Computer – Aided Design and Analysis*. Prentice-Hall of India, 2005.
- [126] Sun, Z., Hu, H., Chen, X., *Numerical optimization of gating system parameters for a magnesium alloy casting with multiple performance characteristics*. Journal of materials processing technology, 199 (1-3), 2008.
- [127] Ou, S., Carlson, K.D., Hardin, R.A., Beckermann, C., *Development of New Feeding Distance Rules Using Casting Simulation; Part II: The New Rules*. Metall. Mater. Trans. B, 33, 2002.
- [128] Онлајн каталог производа за линеарно кретање компаније HIWIN: http://www.hiwin.de/en/Products/Linear_Guideways/Series_HG_QH/Block_HG/HGH/427_5, приступљено 15.09.2016. године.
- [129] Parchami, A., Mashinchi, M., Sharayei, A., *An effective approach for measuring the capability of manufacturing processes*. Production Planning & Control, 21 (3), 2010.
- [130] Azadegana, A., Porobicb, L., Ghazinooryc, S., Samoueid, P., Kheirkahe, S. A., *Fuzzy logic in manufacturing: A review of literature and a specialized application*. International Journal of Production Economics, 132 (2), 2011.
- [131] Dučić, N., Milićević, I., Čojbašić, Ž., Slavković, R., Božić, M., *Simulation of Control Process of Mold Filling with Molten Metal*. International Journal of Simulation Modelling, 2017.
- [132] Dučić, N., Čojbašić, Ž., Slavković, R., Milićević, I., *Optimizacija Sistema livenja nosača zuba bagera vedričara*, 40. JUPITER konferencija sa međunarodnim učešćem, Beograd, 2016.

БИОГРАФИЈА АУТОРА



Недељко Дучић је рођен 03.08.1986. године у Прибоју, где је завршио основну и средњу школу. Основне академске студије на Факултету техничких наука у Чачку, започете 2005. године завршио је 2009. године са просечном оценом 8.85, као стипендиста Фонда за младе таленте Републике Србије. Мастер академске студије, такође завршава на Факултету техничких наука у Чачку, на студијском програму Мехатроника са просечном оценом 9.37, одбранивши мастер рад под називом: „Примена теорије осцилација при изолацији вибрација технолошких система“, дана 14.09.2010. године. Академску каријеру започиње на матичном факултету у звању сарадника на катедри за Мехатронику, 01.10.2010. године. Маја 2011. године изабран је у звање асистента на Факултету техничких наука у Чачку, и од тог тренутка укључен је у извођење вежби на неколико предмета као што су: Аутоматизација процеса, Производни системи, Програмско управљање машинама итд. Учесник је пројекта „Примена метода вештачке интелигенције у истраживањима и развоју производних процеса - TP35015“, финансираног од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Аутор је и коаутор више од 30 научних радова, међу којима 8 радова је са СЦИ листе, два техничка решења, универзитетског уџбеника из предмета на коме изводи вежбе. Највећи део радова је из области производних технологија и вештачке интелигенције.

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног
 родитеља и име Дучић, Градимир, Недељко
 Датум и место рођења 03.08.1986. године, Прибој.

Основне студије

Универзитет	Универзитет у Крагујевцу
Факултет	Факултет техничких наука у Чачку
Студијски програм	Техника и информатика
Звање	Професор технике и информатике
Година уписа	2005
Година завршетка	2009
Просечна оцена	8.85

Мастер студије, магистарске студије

Универзитет	Универзитет у Крагујевцу
Факултет	Факултет техничких наука у Чачку
Студијски програм	Мехатроника
Звање	Мастер инжењер Мехатронике
Година уписа	2009
Година завршетка	2010
Просечна оцена	9.37
Научна област	Производне технологије
Наслов завршног рада	Примена теорије осцилација при изолацији вибрација технолошких система

Докторске студије

Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	Машински факултет у Нишу
Студијски програм	Мехатроника и управљање
Година уписа	2010
Остварен број ЕСПБ бодова	150
Просечна оцена	9.56

НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске дисертације	Интелигентно управљање, моделирање и оптимизација процеса ливења
Име и презиме ментора, звање	др Жарко Ђојбашић, редовни професор
Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације	НСВ 8/20-01-005/16-017, 04.07.2016. године.

ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна	144
Број поглавља	6
Број слика (шема, графика)	106
Број табела	28
Број прилога	-

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ			
Примљено: 17.11.2016.			
Срг.јед.	Број	Прилог	Вредности
	612-674/16		

**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>Дучић Н., Милићевић И., Тојбашевић Ж., Манасијевић С., Радиша Р., Славковић Р., Божић М., Intelligent system for automatic control of the process of filling the mold, <i>Int J Adv Manuf Technol</i>, First Online: 11 October 2016 , DOI 10.1007/s00170-016-9552-x.</p> <p>У раду је представљен развој фази и неуро-фази интелигентног система за управљање процесом пуњења калуца у ливници. Управљање је засновано на задовољењу три кључне тачке процеса, и то: прецизан пад млаза, одржавање нивоа константним у уливној чаши и елиминација преливања из уливне чаше. Могућност примене интелигентног управљања у поменутом процесу тестирана је на лабораторијском постројењу, развијеном за наведену сврху.</p>	M22
2	<p>Дучић Н., Тојбашевић Ж., Манасијевић С., Радиша Р., Славковић Р., Милићевић И., Optimization of the Gating System for Sand Casting Using Genetic Algorithm, <i>International Journal of Metalcasting</i>, DOI: 10.1007/s40962-016-0040-8.</p> <p>У раду је представљена методологија унапређења процеса ливења у песку, носача зуба багера, која обухвата примену генетских алгоритама у оптимизацији геометрије уливног система. Примарни циљ оптимизације геометрије уливног система је да максимизује брзину пуњења калуца, узимајући у обзир дефинисана ограничења, као што су модул уливника и Рејнолдсов број. Предмет оптимизације су димезије уливника и висина ливења. На бази вредности оптимизованих величина пројектована је целокупна геометрија уливног система. Примарни циљ оптимизације система храњења одливка јесте смањење утрошка материјала, уз поштовање одговарајућих геометријских лимита. Оптимизовано решење система ливења подвргнуто је нумеричкој симулацији. Након потврде о ваљаности дизајнираног и оптимизованог система уследила је индустријска имплементација.</p>	M23
3	<p>Дучић Н., Тојбашевић Ж., Славковић Р., Јордовић Б., Пуреновић Ј., Optimization of Chemical Composition in The Manufacturing Process of Flotation Balls Based on Intelligent Soft Sensing, <i>Hemijaska industrija</i>, DOI:10.2298/HEMIND150715068D.</p> <p>У овом раду представљена је примена рачунарске интелигенције у моделирању и оптимизацији параметара два повезана производна процеса – флотација руде и производња кугли за флотацију руде. Комбинацијом неуронске мреже и генетског алгорита добијен је хемијски састав и тврдоћа која гарантује најмање хабање кугли у процесу флотације руде. На бази резултата неуро–генетске комбинације, као референтног хемијског састава, креирана је нова неуронска мрежа као интелигентни софтверски сензор у процесу легирања, ради добијања жељеног хемијског састава белог ливеног гвожђа за производњу флотацијских кугли.</p>	M23
4	<p>Тојбашевић Ж., Петковић Д., Shamshirband S., Tongc C. W., Chc S., Јанковић П., Дучић Н., Баралић Ј., Surface roughness prediction by extreme learning machine constructed with abrasive water jet, <i>Precision Engineering</i>, 2016., Vol. 43, pp. 86–92, DOI:10.1016/j.precisioneng.2015.06.013.</p> <p>У овом раду моделиран је процес сечења воденим млазом, са циљем успостављања зависности између храпавости површине и параметара резања (дебљина предмета обраде, проток и брзина резања). Како би се обезбедили подаци за моделирање процеса извршени су обимни експерименти са различитим режимима резања. Коришћене технике у моделирању процеса су: екстремно машинско учење, генетско програмирање и неуронске мреже. Извршена је компаративна анализа резултата коришћених техника у предикцији храпавости и изнесен закључак да је екстремно машинско учење дало боље резултате у поређењу са наведеним коришћеним техникама. Примена неуро мрежа у овом истраживању представља важан сегмент истраживачког рада кандидата на докторату.</p>	M21 (SCI, SCIE)
5	<p>Славковић Р., Арсовски С., Вег А., Југовић М., Јовичић А. Дучић Н., Casting Process Optimization by the Regression Analysis Applied on the Wear Resistant Parts Molding, <i>Technical Gazette</i>, Vol. 19 No. 1, pp. 141-146, 2012.</p> <p>У овом раду, спроводећи свеобухватно истраживање процеса ливења делова отпорних на хабање (ливење белог гвожђа), успостављена је значајна корелација између технолошких параметара (температура, време старења у калуци и проток расхладног средства) и тврдоће финалног производа. Основна теорија Вох-Вилсонове методе градијента чинила је основу за дефинисање кохерентности параметара процеса будући да је њихова дисперзија у испитиваном процесу релативно мала. Главни је циљ експеримента била дефиниција оптималних услова ливења. Стога су идентификоване различите технолошке руте и модификације у процесу ливења док се није постигао најбољи резултат. Циљна је функција у почетку имала облик хипотезе, али је касније добила конзистентан облик применом статистичких података добијених експериментом, оптимизацијом процеса и управљањем процесом на бази емпиријске повратне везе. Рад представља почетна истраживања кандидата у области ливарства и на својеврстан начин дефинише даље истраживачке правце кандидата у раду докторске дисертације.</p>	M23
6	<p>Славковић Р., Југовић З., Милићевић И., Поповић М., Дучић Н., Недељковић Б. Simulation Methodology as the Basis of CAD/CAM/CAE Design of Dynamically Loaded Castings in Machine Building, <i>Metalurgia International</i>, (2012), vol. 17 br. 4, str. 19-26.</p>	M23

	<p>Заједно са практичним знањем из ливница, програми за симулацију се користе да би процес ливења боље разумели и лакше управљали њиме. Цео процес од пуњења течног метала у калуп до очвршћавања и исхране је доступан, а „хладно ливење” на рачунару омогућава да се побољша процес. У овом раду представљен је концепт примене CAD/CAE/CAM технологија у конструисању и симулацији процеса производње два дела зуба роторног багера. MAGMASOFT софтвер је коришћен за симулацију технолошког процеса ливења. Овај приступ се показао као веома добар за испуњење строгих захтева квалитета уз минималан ризик од грешке у технолошком процесу ливења. Рад представља почетна истраживања кандидата у области ливарства на својеврстан начин дефинише даље истраживачке правце кандидата у раду докторске дисертације.</p>	
7	<p>Дучић Н., Ћојбашић Ж., Радиша Р., Славковић Р., Милићевић И., CAD/CAM design and the genetic optimization of feeders for sand casting process, <i>FACTA UNIVERSITATIS Series: Mechanical Engineering</i>, 14 (2), 2016.</p> <p>У раду је представљена методологија оптимизације и дизајна система храњења за процес ливења у песку. Процес дизајна и оптимизације заснован је на примени правила која су резултат дугогодишњег рада истраживача у области ливења метала. Комбинација CAD система и генетског алгоритма дала је оптимално решење система храњења чија је ваљаност верификована нумеричком симулацијом.</p>	M51
8	<p>Милтеновић В., Дучић Н., Славковић Р., Радоњић С., Бошковић Н., Increase of the operating life of a mould during the casting process of flotation balls with the aid of triz method, <i>FACTA UNIVERSITATIS Series: Mechanical Engineering</i>, Vol. 10, No 1, 2012, pp. 31 – 40.</p> <p>У раду је представљена примена ТРИЗ методе у области ливарства, као методологија решавања проблема која почива на систематичном и логичком приступу развијеном на основу студиозног изучавања великог броја патената. Један од фактора који утичу на ефективност процеса ливења флотацијских кугли је хабање алата за ливење кугли (кокила). Као карактеристика система коју треба умањити истиче се смањење хабања алата. Функција која се уводи је заштита алата, која се спроводи на начине добијене коришћењем Алштулерове матрице. Рад представља почетна истраживања кандидата у области ливарства и на својеврстан начин дефинише даље истраживачке правце кандидата у раду докторске дисертације.</p>	M51
9	<p>Дучић Н., Ћојбашић Ж., Славковић Р., <i>Floating balls wear rate prediction using back propagation and RBF neural networks</i>, The 8th International Symposium KOD 2014, Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, Proceedings, pp.211-214, Hungary, Balatonfüred (2014).</p> <p>У овом раду коришћена су два различита типа неуронски мрежа са циљем да се предвиди ниво хабања флотацијских кугли. Ниво хабања кугли у процесу флотације руде, моделиран је у функцији њиховог хемијског састава (C, Cr, Mn, Si) и тврдоће (HRC). Мрежа која користи алгоритам са пропагацијом грешке уназад, и чија је архитектура 5-5-1, показала је већу способност од мреже која користи Гаусову функцију као активациону функцију неурона.</p>	M33
10	<p>Дучић Н., Ћојбашић Ж., Славковић Р., Марковић Н., GA and PSO Optimization of Feeders for Sand Casting Process, Proceedings of the XIII International Conference SAUM, Niš, Serbia, 2016.</p> <p>Рад представља напредну примену генетских алгоритама и метода ројева честица за оптимизацију хранитеља код ливења у песку. Разматра се ливење носача зуба багера, а предмет оптимизације су број, пречник и висина хранитеља. Оптимизација је базирана на примени правила која су развијена на основу искуства у области ливења. Код дизајнирања хранитеља и симулације процеса ливења коришћене су CAD/CAM методологије. Упореди су резултати добијени применом две различите методологије метахеуристичке оптимизације.</p>	M33
11	<p>Дучић Н., Ћојбашић Ж., Славковић Р., The Application of Neural Network in Managing White Cast Iron Production, Proceedings of the 2nd international scientific conference "Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications" COMETA2014, East Sarajevo – Jahorina, 2014, ISBN 978-99976-623-2-3.</p> <p>У раду је представљена методологија моделирања процеса добијања белог ливеног гвожђа у индукционој пећи, употребом неуронске мреже. Главни циљ предложене неуронске мреже је управљање процесом легирања у функцији добијања жељеног хемијског састава белог ливеног гвожђа. Природа процеса топљења је комплексна, између осталог због динамике нелинеарних хемијских реакција. Неуронске мреже су у стању да идентификују унутрашње релације кроз процес обуке. За изградњу модела неуронских мрежа са пропагацијом грешке уназад, коришћени су подаци из компаније "ИКГ Гуча". Фаза тестирања потврдила је оправданост употребе неуронске мреже као софтверског алата за управљање процесом легирања у циљу добијања жељеног хемијског састава.</p>	M33
12	<p>Дучић Н., Ћојбашић Ж., Славковић Р., Милићевић И., Оптимизација система ливења носача зуба багера ведричара, 40. Јупитер конференција са међународним учешћем, Београд, 2016.</p> <p>У раду је представљена методологија унапређења процеса ливења у песку, носача зуба багера, која се огледа у оптимизацији геометрије уливног система. Примарни циљ оптимизације геометрије уливног система је да максимизује брзину пуњења калупа, узимајући у обзир дефинисана ограничења, као што су модул уливника и рејнолдсов број. Предмет оптимизације су димензије уливника и висина ливења.</p>	M63

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

ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

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

ДА

Одлуком Научно-стручног већа за техничко-технолошке науке бр. 8/20-01-005/16-017 од 04.07.2016. године дата је сагласност на тему ове докторске дисертације и тиме усвојена оцена Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације да кандидат испуњава све потребне услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Нишу и Статутом Машинског факултета Универзитета у Нишу за стицање права на пријаву теме и израду докторске дисертације.

Кандидат је у међувремену поднео радну верзију докторске дисертације одговарајуће садржине, обима и квалитета, у складу са одобреном темом докторске дисертације.

ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације (до 500 речи)

Дисертација је организована у шест поглавља, кроз која су предложени поступци за унапређење процеса ливења засновани на примени метода вештачке интелигенције уз коришћење савремених софтверских пакета за моделирање и нумеричку симулацију процеса ливења. Претходе им резиме на српском и енглеском језику, садржај и листе табела и слика. На крају се налази литература са списком од 132 референце.

У уводном поглављу истакнути су основи процеса ливења и метода рачунарске интелигенције. Кроз уводни део такође је дат преглед литературе са освртом на примену метода рачунарске интелигенције на шири спектар производних технологија, као и исцрпан преглед примене метода рачунарске интелигенције у области ливарства. Коначно, уводни део се завршава приказом предмета истраживања и примењених научних метода.

Друго поглавље садржи опис метода рачунарске интелигенције примењених у дисертацији. Кроз текст другог поглавља изложени су теоријски садржаји о неуронским мрежама, методама глобалне оптимизације, фази и неуро-фази системима.

У трећем поглављу представљена је методологија моделирања процеса топљења метала. Реализовано истраживање унапредило је процес топљења метала, у смислу добијања жељеног хемијског састава. Истраживање је укључило и развој интелигентног софтверског сензора за управљање процесом легирања, као и развој решења за интеграцију два међусобно повезана производна процеса. Повезивање производних процеса и развој интелигентног софтверског сензора базирано је на комбинованој примени неуронских мрежа и генетског алгорита. Подаци на којима се темељи истраживање прикупљени су у индустријским комплексима “РТБ Бор” и “ИКГ Гуча”.

Четврто поглавље је посвећено представљању методологије конструисања оптималног система ливења за одливке комплексне геометрије, који треба да одговори захтевима за високим квалитетом одливка и уштедом материјала. Предмет истраживања је процес ливења у песку носача зуба багера из Рударског басена Колубара. Генетски алгоритам и оптимизација ројем честица, као оптимизационе технике засноване на биолошким процесима, употребљене су за дефинисање кључне геометрије система ливења, као и геометрије система храњења одливка. Савремени софтверски системи PTC Creo 2.0 Academic Edition и MAGMASOFT употребљени су у фазама моделирања система ливења и нумеричке симулације процеса ливења у песку.

У петом поглављу су представљене могућности примене интелигентног управљања, заснованог преваходно на фази и неуро-фази системима, у производном процесу ливења. У ту сврху представљена је идеја аутоматизованог погона у ливници, а затим је развијен лабораторијски симулатор ливења који је коришћен као експериментална опрема у истраживању. Његове функције приближене су реално остварљивом индустријском аутоматизованом погону. Основни циљ управљања, поред побољшања услова рада за производне раднике, представља и прецизно пуњење калупа. Појам прецизно пуњење калупа дефинисан је са три кључна захтева током процеса. Први је прецизно падање млаза у уливну чашу, други је одржавање константног нивоа истопљеног метала у чаши и коначно трећи је елиминисање преливања истопљеног метала из калупа. Сва три захтева су задовољена креираном интелигентном управљачком структуром.

У шестом поглављу су представљени закључци и правци даљих истраживања.

ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

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

Кандидат је успешно остварио постављене циљеве из пријаве докторске дисертације. Потврђена је хипотеза да је активности у производним процесима ливења могуће унапредити техникама рачунарске интелигенције, што за последицу има унапређење производње у смислу ефикасности, економичности и квалитета. Представљена истраживања су обухватила више научноистраживачких праваца. Успешно је представљена примена техника рачунарске интелигенције у моделирању, оптимизацији и управљању процесима у ливници.

Применом техника рачунарске интелигенције приказано је управљање процесом легирања, као и интеграција два међусобно повезана производна процеса. Истраживачки циљеви постављени за оптимално конструисање система ливења су успешно остварени. Комбинацијом CAD/CAM система и оптимизационих техника креирана су оптимална решења уливног система и система храњења за одлив комплексне геометрије. Истраживачки циљ који се односи на унапређење процеса пуњења калупа кроз развој одговарајућег интелигентног управљачког система, такође је успешно остварен. Управљачки задатак, који је дефинисан трима тачкама: прецизност пада млаза у уливну чашу, одржавање константног нивоа у чаши и елиминисања преливања из калупа, успешно је решен применом техника рачунарске интелигенције.

Дакле, кроз реализацију постављених циљева у поднетој докторској дисертацији предложено је унапређење процеса у ливарству са више аспеката, применом више разнородних али комплементарних техника рачунарске интелигенције.

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

Обрађивана тема докторске дисертације је значајна и актуелна, у научном и практичном смислу. Део резултата, непосредно проистеклих из истраживања везаних за ову дисертацију, већ је верификован публикавањем у високо ранжираним часописима, као и у Зборницима с међународних и домаћих конференција. Поднета докторска дисертација представља оригиналан и вредан научни и стручни допринос кандидата, док се као најзнајнији могу истаћи следећи резултати:

- Развијена је методологија примене неуронских мрежа у моделирању процеса топљења метала и управљању процесом легирања.
- Представљена је методологија интеграције два међусобно повезана производна процеса применом неуронских мрежа и генетског алгорита.
- Развијена је нова методологија оптималног конструисања уливног система комплексних одливака, заснована на генетској оптимизацији, оптимизацији ројем честица и нумеричкој симулацији.
- Представљена је нова методологија оптималног конструисања система храњења сложених одливака, заснована на метахеуристичкој оптимизацији и нумеричкој симулацији.
- Предложена је методологија фази и неуро-фази управљања процесом пуњења калупа у лабораторијским условима, уз развој лабораторијског експерименталног симулатора.

Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)

Може се констатовати да је кандидат испољио висок ниво самосталности у раду, пре свега у анализи научних сазнања у областима истраживања (методе рачунарске интелигенције, моделирање, управљање, оптимизација, ливарство) и иницирању нових истраживања, као и оригиналност у осмишљавању и креирању научних и стручних решења. Резултати истраживања спроведених у оквиру рада на докторској дисертацији публиковани су у еминентним часописима и уверљиво потврђују да је кандидат оспособљен за самосталан рад.

ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)

На основу изложене анализе докторске дисертације и увидом у публиковане научне радове кандидата, чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације констатују да поднета докторска дисертација у потпуности одговара теми прихваћеној од стране Наставно-научног већа Машинског факултета у Нишу и Научно-стручног већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу и да представља оригиналан и вредан допринос у области моделирања, управљања и оптимизације процеса ливења применом техника рачунарске интелигенције.

Имајући у виду наведено, Комисија предлаже Наставно научно већу Машинског факултета у Нишу да се поднесу рукопис кандидата **Недељка Дучића**, мастер инжењера мехатронике, под називом:

„ИНТЕЛИГЕНТНО УПРАВЉАЊЕ, МОДЕЛИРАЊЕ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА ЛИВЕЊА“

прихвати као докторска дисертација, а кандидат позове на усмену јавну одбрану.


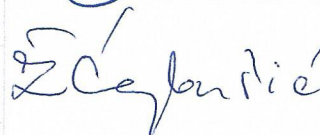


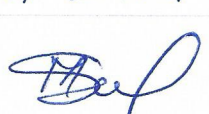
КОМИСИЈА

Број одлуке ННВ о именовању Комисије

8/20-01-007/16-022

Датум именовања Комисије

26.10.2016. године

Р. бр.	Име и презиме, звање		Потпис
1.	др Властимир Николић, редовни професор	председник	
	Аутоматско управљање и роботика (Научна област)	Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	
2.	др Жарко Тојбашевић, редовни професор	ментор, члан	
	Аутоматско управљање и роботика (Научна област)	Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	
3.	др Предраг Јанковић, ванредни професор	члан	
	Производни системи и технологије (Научна област)	Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	
4.	др Милан Ристановић, ванредни професор	члан	
	Аутоматско управљање (Научна област)	Машински факултет у Београду (Установа у којој је запослен)	
5.	др Срећко Манасијевић, научни сарадник	члан	
	Металургија – ливарство (Научна област)	Лола институт Београд (Установа у којој је запослен)	

Датум и место:

10.11.2016.год.

У Нишу и Београду

Прилог 6. Изјаве аутора докторских дисертација

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

Интелигентно управљање, моделирање и оптимизација процеса ливења

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, 26.01.2017. год.

Потпис аутора дисертације:

Недељко Г. Дучић

(Име, средње слово и презиме)



Изјава 2.

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

Наслов дисертације: Интелигентно управљање, моделирање и оптимизација
процеса ливења

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, 26.01.2017. год.

Потпис аутора дисертације:

Недељко Г. Дучић

(Име, средње слово и презиме)



Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

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

Интелигентно управљање, моделирање и оптимизација процеса ливења

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.

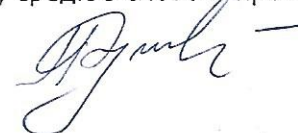
1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)¹

У Нишу, 26.01.2017. год.

Потпис аутора дисертације:

Недељко Г. Дучић

(Име, средње слово и презиме)



¹ Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.