



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ  
ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И  
ИНФОРМАЦИСКИ ТЕХНОЛОГИИ



М-р Борче Постолов

**РАЗВОЈ НА МОДЕЛ БАЗИРАН НА  
ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ ЗА  
ОПТИМИЗАЦИЈА НА ПОГОНОТ НА  
ЕЛЕКТРИЧНИТЕ ЦЕНТРАЛИ ВО СЛОЖЕН  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИ СИСТЕМ СО  
УВАЖУВАЊЕ НА СТОХАСТИЧНОСТА НА  
ПРОИЗВОДСТВОТО ОД ОБНОВЛИВИ  
ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Скопје, 2024 година

## ПОДАТОЦИ ЗА МЕНТОР И ЧЛЕНОВИ НА КОМИСИЈАТА

- Претседател:** **проф. д-р Антон Чаушевски**  
Универзитет “Св. Кирил и Методиј” – Скопје  
Факултет за електротехника и информациски технологии
- Ментор:** **проф. д-р Атанас Илиев**  
Универзитет “Св. Кирил и Методиј” – Скопје  
Факултет за електротехника и информациски технологии
- Член:** **проф. д-р Димитар Димитров**  
Универзитет “Св. Кирил и Методиј” – Скопје  
Факултет за електротехника и информациски технологии
- Член:** **проф. д-р Софија Николова - Поцева**  
Универзитет “Св. Кирил и Методиј” – Скопје  
Факултет за електротехника и информациски технологии
- Член:** **проф. д-р Соња Геговска - Зајкова**  
Универзитет “Св. Кирил и Методиј” – Скопје  
Факултет за електротехника и информациски технологии

Дата на одбрана: \_\_\_\_\_

Дата на промоција: \_\_\_\_\_

Научна област: Електротехника

**Лектор:** **Васка Кирова (Уверение бр. 15-163/7)**

## БОРЧЕ ПОСТОЛОВ

# РАЗВОЈ НА МОДЕЛ БАЗИРАН НА ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ ЗА ОПТИМИЗАЦИЈА НА ПОГОНОТ НА ЕЛЕКТРИЧНИТЕ ЦЕНТРАЛИ ВО СЛОЖЕН ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИ СИСТЕМ СО УВАЖУВАЊЕ НА СТОХАСТИЧНОСТА НА ПРОИЗВОДСТВОТО ОД ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА

### АПСТРАКТ:

Краткорочната хидро-термо координација во комбинација со ветерната енергија (анг. short-term hydro-thermal-wind scheduling – SHTWS) е еден од виталните чекори во оперативното планирање на ЕЕС. Тој ги контролира и економските и еколошките аспекти на електричната енергија, бидејќи SHTWS одлучува за оптималниот удел на производството од термоелектраните, кој од друга страна зависи како од расположливата енергија на хидроелектраните, така и од стохастичноста на ветерната енергија.

Реално гледано, SHTWS е многу нелинеарен, неконвексен динамички оптимизационен проблем со ограничувања. Генерално, SHTWS е формулиран како апроксимативен проблем со занемарување на неконвексноста на критериумската функција, ограничувањето за биланс на моќности со AC модел, ramp rate, ротирачка резерва, напоните на генераторите и напоните на јазлите.

Еволуциските алгоритми (EA) претставуваат потенцијална методологија за решавање на вакви неконвексни оптимизациони проблеми. Многу EA во литературата се применети за решавање на краткорочната хидро-термо координација (анг. short-term hydro-thermal scheduling – SHTS), додека за SHTWS бројот е значително помал. Освен тоа, многу сложени ограничувања кои беа претходно наведени, се занемарени. Од друга страна, поголемите тестни системи, исто така, обично се занемаруваат при решавањето на проблемите SHTS и SHTWS. Истражувањата се сè уште насочени кон пронаоѓање робусни и ефикасни методи, коишто се во состојба комплетно да го решат оптимизациониот проблем SHTWS, со сите ограничувања, меѓу кои и уважување на стохастичноста на ветерната енергија, како и нивна примена на поголеми тест системи.

Предложениот метод заснован на генетски алгоритам (GA) (анг. Novel Self-Adaptive GeneticAlgorithm – NSAGA), претставува нова современа верзија на GA и има одредени инхерентни предности споредбено со класичниот GA и преостанатите претходно предложени метахеуристички

алгоритми (МА). Ваквиот алгоритам сè уште не е истражен и применет ниту на SHTS, ниту на SHTWS.

Во предложеното истражување, оптимизациониот проблем SHTWS е математички моделиран, заедно со сите потребни ограничувања и уважувањето на valve point ефектот во кривата на трошоци за гориво на термоелектраните т.е. критериумската функција. Уважени се ограничувањата за биланс на моќности во секој јазол со AC моделот, ramp rate, активна и реактивна моќност на генераторите, напоните на генераторите и напоните на јазлите, реактивната моќност на компензаторите, различните дотоци во акумулациите, волуменот на акумулациите, протокот на вода низ турбините, почетениот и крајниот волумен на вода во акумулациите, ограничување на расположливото производство на термоелектраните и хидроелектраните, променливата побарувачка на конзумот итн. Како што беше спомнато, уважено е влијанието на стохастичноста на ветерната енергија врз трошоците за работа и параметрите на системот, преку нов предложен математички модел, во кој се генерирани 1.000 можни сценарија со методот Монте Карло, кои всушност претставуваат стохастички генерирани оптимални текови на моќност (OPF). Предложениот алгоритам е тестиран на четири тест системи, различни по големина и сложеност, а резултатите се споредени со добиените резултати од претходно предложени МА.

Како додатно би се подобриле перформансите на предложениот NSAGA во контекст на прераната конвергенција и заробувањето во локални оптимуми, предложен е хибриден пристап при математичкото моделирање на NSAGA. Хибридниот пристап се состои во тоа што со новите стратегии за вкрстување и мутација, како и современите техники за справување со ограничувањата, моделирани и интегрирани се соодветни механизми за поправка на решението, со коишто тоа се враќа во допустливиот регион. Тестирањето на предложениот алгоритам на сите претходно спомнати тест системи, покажало дека NSAGA дава подобри резултати од другите неодамна објавени МА во литературата.

Предложеното истражување претставува вреден додаток во низата методологии за решавање на SHTWS. NSAGA поседува способност за уважување на сите потребни ограничувања, како и способност за решавање сложен пребарувачки простор со врвни резултати, во споредба со другите нови техники коишто се достапни во литературата.

**КЛУЧНИ ЗБОРОВИ:** short-term hydro-thermal-wind scheduling, оптимални текови на моќност, Novel Self-Adaptive GeneticAlgorithm (NSAGA), метода Монте Карло, техники за справување со ограничувањата

## **BORCHE POSTOLOV**

### **DEVELOPMENT OF A MODEL BASED ON A GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZATION OF POWER PLANTS OPERATION IN A COMPLEX POWER SYSTEM BY CONSIDERING THE STOCHASTICITY OF ELECTRICITY PRODUCTION FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES**

#### **ABSTRACT:**

Short-term hydro-thermal-wind scheduling (SHTWS) is one of the vital steps in the operational planning of power systems. It controls both the economic and environmental aspects of electricity, as the SHTWS decides on the optimal production from thermal power plants, which on the other hand depends on both the available production of hydropower plants and of the wind power's stochasticity.

Realistically, SHTWS is a highly nonlinear, nonconvex dynamic constrained optimization problem. In general, the SHTWS is formulated as an approximation problem by neglecting the non-convexity of the objective function, the AC model power balance constraint, ramp rate constraint, spinning reserve, generator voltages and bus voltages.

Evolutionary algorithms (EA) represent a potential methodology for solving such non-convex optimization problems. Many EAs in the literature have been applied to solve short-term hydro-thermal scheduling (SHTS), while for SHTWS the number is significantly lower. Moreover, many complex constraints that were previously stated are neglected. On the other hand, larger test systems are also usually neglected when solving SHTS and SHTWS problems. Research is still focused on finding robust and efficient methods, which are able to completely solve the SHTWS optimization problem, with all required constraints, including wind energy stochasticity, as well as their application to larger test systems.

The proposed method based on a genetic algorithm (GA) (Novel Self-Adaptive Genetic Algorithm – NSAGA), represents a new modern version of GA and has certain inherent advantages compared to the classic GA and the rest of the previously proposed metaheuristic algorithms (MA). Such an algorithm has not yet been researched and applied to SHTS or SHTWS.

In the proposed research, the SHTWS optimization problem is mathematically modeled, along with all the necessary constraints and the including the valve point effect in the fuel cost curve of thermal power plants, i.e. the objective function. The constraints which was included are constraints for AC power balance in each bus, ramp rate, active and reactive power of the generators,

generator voltages and the bus voltages, shunt's reactive power, the different reservoirs inflows, the reservoirs volume, the water discharge, the initial and final volume of the reservoirs, available production of the thermal power plants and hydropower plants, the changing of the demand, etc. As mentioned, the impact of the stochasticity of wind energy on the total fuel costs and system parameters is considered, through a new proposed mathematical model, in which 1000 possible scenarios are generated by the Monte Carlo method, which actually represent stochastically generated optimal power flows (OPF). The proposed algorithm is tested on four test systems, different in size and complexity, and the results are compared with the results obtained from previously proposed MAs.

In order to further improve the performance of the proposed NSAGA in the context of premature convergence and entrapment in local optima, a hybrid approach to mathematical modeling of NSAGA is proposed. The hybrid approach consists in that with the new crossover and mutation strategies, as well as the novel constraint handling techniques, an appropriate repairing mechanisms are modeled and integrated, with which the same is returned to the feasible region. Testing the proposed algorithm on all previously mentioned test systems, showed that NSAGA gives better results than other recently published MA in the literature.

The proposed research represents a valuable addition to the array of methodologies for addressing SHTWS. NSAGA possesses the ability to consider all necessary constraints as well as the ability to solve a complex search space with superior results, compared to other new techniques available in the literature.

**KEYWORDS:**short-term hydro-thermal-wind scheduling, optimal power flow, Novel Self-Adaptive GeneticAlgorithm (NSAGA), Monte Carlo method, constraint handling techniques

*Посветено на моето семејство*

## **Благодарност на авторот**

*Оваа докторска дисертација претставува резултат на повеќегодишното образование и научно-истражувачката работа, па од таа причина чувствувам потреба да ја искажам својата искрена благодарност и почит кон моите професори, колеги, пријатели и роднини, кои на тој пат ми пружиле голема помош и поддршка.*

*Својата голема благодарност ја должам на мојот ментор, проф. д-р Атанас Илиев за актуелниот избор на темата, внимателното водење со мојот процес на истражување, како и за целата неопходна помош во текот на повеќегодишната заедничка соработка, која што резултирала со оваа докторска дисертација. Својата благодарност ја должам и на моите професори за несебичната помош, советите, како и предаденото знаење и експертиза во текот на моите студии. Исто така, сакам да изразам посебна благодарност до членовите на комисијата: проф. д-р Атанас Илиев, проф. д-р Димитар Димитров, проф. д-р Антон Чаушевски, проф. д-р Софија Николова-Поцева и проф. д-р Соња Геговска-Зајкова за помошта и сугестиите од моментот на дефинирање, потоа за време како и на самиот крај на изработката на докторската дисертација.*

*Исто така, благодарност им должам на сите сегашни и поранешни колеги на Факултетот за електротехника и информациски технологии во Скопје, за индиректната или директната поддршка во досегашната научно-истражувачка работа.*

*Искрено му се заблагодарувам на моето семејство за укажаната поддршка, мотив, трпение и разбирање при изработката на оваа докторска дисертација.*

Во Скопје, \_\_\_\_\_ .

М-р Борче Постолов, дипл.ел.инж.



# **СОДРЖИНА**

---

# СОДРЖИНА

<b>ЛИСТА НА СЛИКИ .....</b>	<b>xv</b>
<b>ЛИСТА НА ТАБЕЛИ .....</b>	<b>ii</b>
<b>1 ВОВЕД .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 ПРЕГЛЕД НА ДОСТИГНУВАЊАТА НА НАУЧНАТА         ДИСЦИПЛИНА ПОВРЗАНИ СО ПРЕДМЕТОТ НА ИСТРАЖУВАЊЕ         .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.1 Класични градиентни методи .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.2 Детерминистички методи .....</b>	<b>5</b>
1.1.2.1 Лагранжова релаксација и Бендерова декомпозиција .....	5
1.1.2.2 Динамичко програмирање .....	8
1.1.2.3 Мешано целобројно линеарно програмирање.....	9
<b>1.1.3 Методи базирани на вештачка интелигенција .....</b>	<b>9</b>
1.1.3.1 Невронски мрежи .....	9
1.1.3.2 Fuzzy логика .....	9
<b>1.1.4 Еволуциски и хибридни методи.....</b>	<b>10</b>
1.1.4.1 Генетски алгоритам.....	10
1.1.4.2 Particle swarm optimization .....	11
1.1.4.3 Диференцијална еволуција .....	13
1.1.4.4 Gravitational search algorithm.....	13
1.1.4.5 Simulated annealing иTabu search.....	14
1.1.4.6 Cuckoo search algorithm .....	14
<b>1.1.5 Дискусија за претходните истражувања.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1.6 Преглед на достигнувањата на кандидатот во научната             дисциплина поврзани со предметот на истражување .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 ФОРМУЛАЦИЈА НА ИСТРАЖУВАЧКИОТ ПРОБЛЕМ .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3 ПРЕДМЕТ НА ИСТРАЖУВАЊЕ .....</b>	<b>21</b>
<b>1.4 МОТИВАЦИЈА ЗА ИСТРАЖУВАЊЕ .....</b>	<b>23</b>
<b>1.5 ЦЕЛ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО .....</b>	<b>25</b>
<b>1.6 ОБРАЗЛОЖЕНИЕ НА РАБОТНИТЕ ХИПОТЕЗИ И ТЕЗИ.....</b>	<b>26</b>
<b>1.7 НАУЧЕН ПРИДОНЕС.....</b>	<b>27</b>
<b>1.8 СТРУКТУРА НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА .....</b>	<b>28</b>
<b>2 ЕНЕРГЕТСКО-ЕКСПЛОАТАЦИОНИ КАРАКТЕРИСТИКИ     И МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ НА ПРОИЗВОДНИТЕ     КАПАЦИТЕТИ .....</b>	<b>32</b>
<b>2.1 ХИДРОЕЛЕКТРАНИ.....</b>	<b>32</b>

2.1.1	Основни карактеристики на хидроелектраната .....	32
2.1.2	Прилагодување на хидроелектраната на дијаграмот на оптоварување .....	34
2.1.3	Модел на хидроелектрана.....	36
2.1.3.1	Биланс на водниот потенцијал.....	36
2.1.4	Основни технички ограничувања на хидроелектраните .....	38
2.2	ТЕРМОЕЛЕКТРАНИ .....	39
2.2.1	Трошоци за работа во термоелектраните.....	40
2.2.2	Основни карактеристики на термоелектраната .....	41
2.2.3	Апроксимација на енергетските карактеристики на термоелектраната .....	44
2.2.4	Модел на термоелектрана.....	44
2.2.5	Основни технички ограничувања на термоелектраните .....	45
2.3	ВЕТЕРНИ ЕЛЕКТРАНИ.....	45
2.3.1	Статистички показатели на ветерната енергија.....	45
2.3.1.1	Средна брзина и густина на моќност на ветрот .....	46
2.3.1.2	Ружа на ветрови.....	46
2.3.1.3	Дискретен хистограм за брзината на ветрот .....	47
2.3.1.4	Weibull-ова функција на распределба на веројатност за брзина на ветрот .....	49
2.3.2	Енергетска карактеристика на ветерната турбина .....	52
2.3.3	Основно техничко ограничување на ветерните електрани .....	54
3	МЕТОДА МОНТЕ КАРЛО.....	56
3.1	ВОВЕД.....	56
3.2	ДЕФИНИЦИЈА НА МЕТОДОТ .....	58
3.3	СЛУЧАЈНИ БРОЕВИ .....	59
3.4	ТАБЕЛА НА СЛУЧАЈНИ БРОЕВИ .....	59
3.5	ГЕНЕРАТОРИ НА СЛУЧАЈНИ БРОЕВИ.....	61
3.6	МЕТОДА НА ПСЕВДОСЛУЧАЈНИ БРОЕВИ.....	62
3.7	РЕЗУЛТАТИ ОД МЕТОДАТА МОНТЕ КАРЛО.....	63
4	ПРЕСМЕТКА НА ТЕКОВИТЕ НА МОЌНОСТ .....	68
4.1	МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ НА МРЕЖАТА .....	68
4.1.1	Матрица на админтанси на јазлите.....	68
4.2	РАВЕНКИ НА ТЕКОВИТЕ НА МОЌНОСТ И ТИПОВИ НА ЈАЗЛИ ВО СИСТЕМОТ .....	69
4.2.1	Равенки на тековите на моќност .....	69
4.2.2	Класификација на јазлите.....	72

4.3	<b>МЕТОД НА NEWTON-RAPHSON ЗА РЕШАВАЊЕ НА РАВЕНКИТЕ НА ТЕКОВИТЕ НА МОЌНОСТ .....</b>	<b>73</b>
4.3.1	Еднодимензионален проблем .....	73
4.3.2	Повеќедимензионален проблем .....	74
4.3.3	Примена на методот на Newton-Raphson во правоаголни координати за решавање на равенките на тековите на моќност ..	76
4.3.4	Примена на методот на Newton-Raphson во поларни координатиза решавање на равенките на тековите на моќност .....	80
4.3.5	PV јазол во методот на Newton-Raphson .....	82
4.3.6	Моделирање на јазол со ветерна електрана за решавање на равенките на тековите на моќност .....	83
4.4	<b>ЗАГУБИ НА МОЌНОСТ НИЗ ВОД.....</b>	<b>86</b>
5	<b>ВОВЕД ВО ОПТИМИЗАЦИЈА И АЛГОРИТМИ.....</b>	<b>89</b>
5.1	<b>ПОИМ И КАТЕГОРИЗАЦИЈА НА ОПТИМИЗАЦИОНИТЕ ПРОБЛЕМИ.....</b>	<b>89</b>
5.1.1	Таксономија на оптимизационите проблеми.....	90
5.1.1.1	Категоризација според типот на променливите .....	90
5.1.1.2	Категоризација според ограничувањата.....	92
5.1.1.3	Категоризација според бројот на критериумски функции .....	96
5.1.2	Алгоритми и класи на комплексност.....	96
5.2	<b>ТАКСОНОМИЈА НА ОПТИМИЗАЦИОНИТЕ АЛГОРИТМИ .....</b>	<b>98</b>
5.3	<b>МЕТАХЕВРИСТИЧКА ОПТИМИЗАЦИЈА.....</b>	<b>99</b>
5.3.1	Поим и категоризација на хевристиката.....	99
5.3.2	Метахевристички алгоритми.....	101
5.3.3	Метахевристички алгоритми што не се инспирирани од природата .....	104
5.3.3.1	Tabu Search .....	105
5.3.3.2	Differential Evolution.....	106
5.3.3.3	Други претставници на метахевристичката што не се инспирирани од природата .....	107
5.3.4	Метахевристички алгоритми што се инспирирани од природата....	108
5.3.4.1	Генетски алгоритам.....	109
5.3.4.2	Симулирано калење.....	111
5.3.4.3	Интелигенција на роеви .....	112
6	<b>СОВРЕМЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ.....</b>	<b>115</b>
6.1	<b>ВОВЕД.....</b>	<b>115</b>
6.2	<b>КОДИРАЊЕ .....</b>	<b>116</b>
6.3	<b>ПОЧЕТНА ПОПУЛАЦИЈА .....</b>	<b>117</b>

<b>6.4</b>	<b>ФИТНЕС ФУНКЦИЈА</b> .....	117
6.4.1	Релативна фитнес функција.....	118
6.4.2	Линеарно скалирање на фитнес функцијата .....	118
<b>6.5</b>	<b>СЕЛЕКЦИЈА</b> .....	119
6.5.1	Linear ranking selection .....	120
6.5.2	Tournament selection .....	121
<b>6.6</b>	<b>ВКРСТУВАЊЕ</b> .....	122
6.6.1	Uniform crossover.....	123
6.6.2	Two-point crossover.....	123
6.6.3	Simulated Binary Crossover.....	123
6.6.4	Heuristic crossover.....	124
6.6.5	Laplace Crossover.....	124
6.6.6	Logistic distribution-based crossover.....	125
<b>6.7</b>	<b>МУТАЦИЈА</b> .....	127
6.7.1	Non-uniform mutation.....	128
6.7.2	Polynomial mutation.....	128
6.7.3	Makinen, Periaux, and Toivanen mutation .....	128
<b>6.8</b>	<b>ЕЛИТИЗАМ</b> .....	129
<b>6.9</b>	<b>КОНТРОЛНИ ПАРАМЕТРИ НА GA</b> .....	129
<b>6.10</b>	<b>КРИТЕРИУМ ЗА ЗАПИРАЊЕ</b> .....	130
<b>6.11</b>	<b>СОВРЕМЕНИ ТЕХНИКИ ЗА СПРАВУВАЊЕ СО</b> <b>ОГРАНИЧУВАЊАТА</b> .....	130
6.11.1	Superiority of feasible solutions .....	131
6.11.2	Stochastic ranking.....	132
6.11.3	Self-adaptive penalty factor.....	133
6.11.4	Constraint Handling (Repair Mechanism) .....	134
6.11.5	Adaptive crossover strategy.....	134
6.11.6	Adaptive mutation strategy .....	134
<b>7</b>	<b>ОПТИМИЗАЦИЈА НА ПОГОНОТ НА ЕЕС СОСТАВЕН ОД</b> <b>КЛАСИЧНИ И ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ СО ПРИМЕНА НА</b> <b>NSAGA</b> .....	137
<b>7.1</b>	<b>ФАЗА 1: МОДЕЛИРАЊЕ НА СТОХАСТИЧНОСТА НА ВЕТЕРНАТА</b> <b>ЕНЕРГИЈА</b> .....	137
7.1.1	Обработка на мерните податоци за брзините на ветер.....	137
7.1.2	Алгоритам за пресметка на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност.....	137
7.1.3	Симулација Монте Карло.....	138
<b>7.2</b>	<b>ФАЗА 2: ПОТПРОБЛЕМ UNIT COMMITMENT (UC)</b> .....	142

<b>7.2.1</b>	<b>Вовед</b> .....	<b>142</b>
<b>7.2.2</b>	<b>Математичка формулација на потпроблемот UC</b> .....	<b>143</b>
7.2.2.1	Критериумска функција.....	143
7.2.2.2	Ограничувања.....	145
7.2.2.2.1	Генераторско ограничување.....	145
7.2.2.2.2	Ограничување за биланс на моќности.....	145
7.2.2.2.3	Ограничување за ротирачка резерва.....	145
7.2.2.2.4	Ограничување за минималното време на вклучување и исклучување.....	146
7.2.2.2.5	Ограничување за брзината на промена на моќноста на генераторите (ramp rate) .....	147
7.2.2.2.6	Ограничување за преносната моќ на водовите .....	147
7.2.2.2.7	Ограничување за расположлив волумен на вода.....	147
7.2.2.2.8	Ограничување за расположливото производство.....	148
7.2.2.2.9	Ограничување за биланс на водниот потенцијал .....	148
<b>7.2.3</b>	<b>Примена на бинарно-кодирани NSAGA за решавање на потпроблемот UC</b> .....	<b>148</b>
<b>7.3</b>	<b>ФАЗА 3: ПОТПРОБЛЕМ SHORT-TERM HYDRO-THERMAL-WIND SCHEDULING (SHTWS) МОДЕЛИРАН СО DC МОДЕЛ</b> .....	<b>154</b>
<b>7.3.1</b>	<b>Вовед</b> .....	<b>154</b>
<b>7.3.2</b>	<b>DC модел за пресметка на тековите на моќност</b> .....	<b>155</b>
<b>7.3.3</b>	<b>Математичка формулација на потпроблемот SHTWS моделиран со DC модел</b> .....	<b>156</b>
7.3.3.1	Критериумска функција.....	157
7.3.3.2	Ограничувања.....	157
7.3.3.2.1	Генераторско ограничување.....	157
7.3.3.2.2	Ограничување за биланс на моќности.....	157
7.3.3.2.3	Ограничување за ротирачка резерва.....	157
7.3.3.2.4	Ограничување за брзината на промена на моќноста на генераторите (ramp rate) .....	158
7.3.3.2.5	Ограничување за преносната моќ на водовите .....	158
7.3.3.2.6	Ограничување за расположлив волумен на вода.....	158
7.3.3.2.7	Ограничување за расположливото производство.....	158
7.3.3.2.8	Ограничување за биланс на водниот потенцијал .....	159
7.3.3.2.9	Ограничување за почетен и краен волумен на вода во акумулациите .....	159
7.3.3.2.10	Ограничување за проток на вода низ турбината .....	159
7.3.3.2.11	Ограничување за волуменот на вода во акумулациите .....	159
<b>7.3.4</b>	<b>Примена на реално-кодирани NSAGA за решавање на потпроблемот SHTWS моделиран со DC модел</b> .....	<b>159</b>

<b>7.4</b>	<b>ФАЗА 3: ПОТПРОБЛЕМ SHORT-TERM HYDRO-THERMAL-WIND SCHEDULING (SHTWS) МОДЕЛИРАН СО АС МОДЕЛ .....</b>	<b>165</b>
7.4.1	Вовед .....	165
7.4.2	Математичка формулација на потпроблемот SHTWS моделиран со АС модел .....	165
7.4.2.1	Критериумска функција .....	166
7.4.2.2	Ограничувања .....	166
7.4.2.2.1	Генераторско ограничување за активната моќност .....	166
7.4.2.2.2	Генераторско ограничување за реактивната моќност .....	166
7.4.2.2.3	Ограничување за биланс на моќности .....	166
7.4.2.2.4	Ограничување за ротирачка резерва .....	167
7.4.2.2.5	Ограничување за брзината на промена на моќноста на генераторите (ramp rate) .....	167
7.4.2.2.6	Ограничување за преносната моќ на водовите .....	167
7.4.2.2.7	Ограничување за расположлив волумен на вода .....	167
7.4.2.2.8	Ограничување за расположливото производство .....	168
7.4.2.2.9	Ограничување за биланс на водниот потенцијал .....	168
7.4.2.2.10	Ограничување за почетен и краен волумен на вода во акумулациите .....	168
7.4.2.2.11	Ограничување за проток на вода низ турбината .....	168
7.4.2.2.12	Ограничување за волуменот на вода во акумулациите .....	168
7.4.2.2.13	Ограничување за напонот на генераторите .....	168
7.4.2.2.14	Ограничување за напонот на јазлите на потрошувачите .....	168
7.4.2.2.15	Ограничување за реактивната моќност на компензаторите .....	169
7.4.2.3	Контролни, состојбени и зависни променливи .....	169
7.4.3	Примена на реално-кодиран NSAGA за решавање на потпроблемот SHTWS моделиран со АС модел .....	169
<b>8</b>	<b>РЕЗУЛТАТИ ОД ОПТИМИЗАЦИЈАТА НА ПОГОНОТ НА ЕЕС СОСТАВЕН ОД КЛАСИЧНИ И ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ СО ПРИМЕНА НА NSAGA .....</b>	<b>178</b>
8.1	РЕЗУЛТАТИ ОД МОДЕЛИРАЊЕТО НА СТОХАСТИЧНОСТА НА ВЕТЕРНАТА ЕНЕРГИЈА .....	178
8.1.1	Резултати од пресметката на параметрите на Weibull-овата функција на густина на веројатност .....	178
8.1.2	Резултати од симулациите со методата Монте Карло и приказ на добиените хистограми со распределба на веројатноста на брзините на ветер за соодветната сезона .....	183
8.1.3	Анализа на добиените резултати од моделирањето на стохастичноста на ветерната енергија .....	187
8.2	UNIT COMMITMENT (UC) .....	187

8.2.1	Тест систем 1.....	187
8.3	SHORT-TERM HYDRO-THERMAL SCHEDULING (SHTS) СО DC МОДЕЛ .....	190
8.3.1	Тест систем 2.....	190
8.3.2	Тест систем 3.....	191
8.4	SHORT-TERM HYDRO-THERMAL SCHEDULING (SHTS) СО AC МОДЕЛ .....	192
8.4.1	Тест систем 4.....	192
8.5	ПРИМЕНА НА NSAGA ЗА РЕШАВАЊЕ НА SHORT-TERM HYDRO- THERMAL SCHEDULING (SHTS) НА IEEE 30 BUS SYSTEM.....	195
8.5.1	DC модел .....	196
8.5.2	AC модел .....	199
9	СЛУЧАЈ ЗА АНАЛИЗА: SHORT-TERM HYDRO-THERMAL- WIND SCHEDULING (SHTWS) МОДЕЛИРАНА СО AC МОДЕЛ И НЕЈЗИНА ПРИМЕНА НА МОДИФИЦИРАН IEEE 30 BUS TEST SYSTEM .....	205
10	АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ.....	231
10.1	КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ СО РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ДРУГИТЕ МЕТАХЕУРИСТИЧКИ АЛГОРИТМИ 231	
10.2	КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ ОД DC И AC МОДЕЛОТ .....	233
10.3	АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ ОД СЛУЧАЈОТ ЗА АНАЛИЗА.....	234
11	ЗАКЛУЧОК.....	238
11.1	ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА .....	240
11.2	ПРАКТИЧНА ПРИМЕНА.....	240
	ДОДАТОК А ХИСТОГРАМИ СО РАСПРЕДЕЛБА НА ВЕРОЈАТНОСТА ЗА АКТИВНАТА МОКНОСТ НА ГЕНЕРАТОРИТЕ.....	242
	ЛИСТА НА ОБЈАВЕНИ ТРУДОВИ ОД НАЈТЕСНАТА ОБЛАСТ НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА .....	261
	КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА.....	263
	БИОГРАФИЈА .....	272



## ЛИСТА НА СЛИКИ

Слика 1.1 Број на објавени трудови за оптимизациониот проблем SHTCP за периодот 2005 - 2016 .....	3
Слика 1.2 Број на објавени трудови во зависност од применетиот оптимизационен метод.....	3
Слика 2.1 Основна енергетска карактеристика на хидроагрегат за одреден константен нето пад.....	34
Слика 2.2 Карактеристика на специфична потрошувачка на вода на хидроагрегат.....	34
Слика 2.3 Карактеристика на диференцијалниот прираст на потрошувачка на вода на хидроагрегат.....	34
Слика 2.4 Модел на акумулациона хидроелектрана.....	37
Слика 2.5 Модел на три каскадно врзани хидроелектрани .....	38
Слика 2.6 Зависност на трошоците за ставање во погон на термо блоковите кои претходно биле природно оладени или одржувани во топла состојба .....	41
Слика 2.7 Блок шема на термо блок за одредување на основните енергетски карактеристики .....	42
Слика 2.8 Основна енергетска влезно - излезна карактеристика на кондензациона термоелектрана .....	43
Слика 2.9 Карактеристика на специфичната потрошувачка на топлина на термо блок на кондензациона термоелектрана .....	43
Слика 2.10 Карактеристика на диференцијалниот прираст на потрошувачка на топлина на термо блок на кондензациона термоелектрана.....	44
Слика 2.11 Ружа на ветрови добиена врз основа на мерни податоци на висина од 60 m.....	47
Слика 2.12 Ружа на ветрови добиена врз основа на мерни податоци на висина од 60 m.....	48
Слика 2.13 Ружа на ветрови добиена врз основа на мерни податоци на висина од 60 m.....	48
Слика 2.14 Подреден годишен дијаграм за кумулативно траење на брзината на ветрот на различни висини над тлото .....	49
Слика 2.15 Weibull-ова функција на густина на распределба на веројатноста за појава на брзината на ветрот на висина од 60 m.....	50
Слика 2.16 Криви на коефициентот на моќност во функција од брзината на вртење при различни брзини на ветер .....	52
Слика 2.17 Енергетска карактеристика на ветерна турбина со назначени карактеристични интервали .....	53
Слика 3.1 Процес на Монте Карло симулација .....	59
Слика 3.2 Рулет метода.....	61
Слика 3.3 Хистограм (за нормална распределба) .....	65
Слика 4.1 Поедноставен приказ на јазол $i$ со генератор, потрошувачи и преносни водови.....	70
Слика 4.2 Поедноставен приказ на јазол $i$ со симбол за нето моќност во јазолот и преносните водови.....	70
Слика 4.3 Ветерна турбина со асинхронен генератор за пресметка на тековите на моќност.....	84
Слика 4.4 Упростена еквивалентна шема на асинхронен генератор со кондензаторска батерија.....	85

Слика 4.5 Модел на ветерна електрана со PQ јазол.....	86
Слика 4.6 Модел на преносен вод за пресметка на текови на моќност .....	87
Слика 5.1 Пример на проблем со глобална оптимизација .....	92
Слика 5.2 Пребарувачки простор со криви на ограничувања .....	94
Слика 5.3 Поделба на оптимизационите алгоритми.....	99
Слика 6.1 Основна идеја на GA.....	116
Слика 6.2 Споредба помеѓу linear ranking selection и roulette-wheel selection .....	121
Слика 6.3 Приказ на tournament selection.....	122
Слика 7.1 Дијаграм на тек на фаза 1 од предложениот алгоритам за оптимизација на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори .....	141
Слика 7.2 Декомпозиција на проблемот ангажирање на агрегатите .....	142
Слика 7.3 Дијаграм на тек на фаза 2 од предложениот алгоритам за оптимизација на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори .....	154
Слика 7.4 Дијаграм на тек на фаза 3 (DC модел) од предложениот алгоритам за оптимизација на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори.....	164
Слика 7.5 Дијаграм на тек на фаза 3 (AC модел) од предложениот алгоритам за оптимизација на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори.....	175
Слика 7.6 Дијаграм на тек на предложениот алгоритам за оптимизација на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори.....	176
Слика 8.1 Приказ на излезните параметри од моделираната програма „method_na_newton_weibull_parametar.m“ во Matlab (за сезона пролет).....	178
Слика 8.2 Хистограми со распределба на веројатноста за појава на брзините на ветер за интервал 1 – 24.....	186
Слика 9.1 Еднополна шема на модифициран IEEE 30 bus system .....	205
Слика 9.2 Блок шема на ветроагрегат со SCIG.....	210
Слика 9.3 Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на ветерната електрана за интервал 1 – 24 .....	213
Слика 9.4 Графички приказ на оптимални текови на моќност (оптимални вредности за напоните и фазните агли на јазлите) за интервал 1 за модифициран IEEE 30 bus system со примена на NSAGA .....	215
Слика 9.5 Графички приказ на моќностите и загубите низ преносните водови на SHTWS за интервал 1 за модифициран IEEE 30 bus system со примена на NSAGA .....	216
Слика 9.6 Хистограм со распределба на веројатноста за вкупните трошоци за работа на оптимизациониот проблем SHTWS.....	226
Слика 9.7 Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генераторите за интервал 1 .....	227
Слика 9.8 Хистограми со распределба на веројатноста за напоните на генераторите за интервал 1 .....	228
Слика 9.9 Хистограми со распределба на веројатноста за привидната моќност на преносните водови (по случаен избор) за интервал 1 .....	229

Слика А 1	Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генератор 1 .....	244
Слика А 2	Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генератор 2 .....	247
Слика А 3	Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генератор 3 .....	250
Слика А 4	Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генератор 4 .....	253
Слика А 5	Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генератор 5 .....	256
Слика А 6	Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генератор 6 .....	259

## ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

Табела 3.1 Вредност на параметрот за дадени вредности на нивото на доверба.....	58
Табела 3.2 Табела на случајни броеви.....	60
Табела 3.3 Распределба на фреквенцијата на случајни цифри од табелата на случајни броеви .....	60
Табела 3.4 Функции на густина на распределба.....	63
Табела 4.1 Класификација на јазлите.....	72
Табела 8.1 Итеративна постапка за пресметка на сезонските вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната пролет со метод на Newton .....	179
Табела 8.2 Сезонски вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната пролет и нивна споредба со функцијата mle во Matlab.....	179
Табела 8.3 Итеративна постапка за пресметка на сезонските вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната лето со метод на Newton .....	180
Табела 8.4 Сезонски вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната лето и нивна споредба со функцијата mle во Matlab.....	181
Табела 8.5 Итеративна постапка за пресметка на сезонските вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната есен со метод на Newton .....	181
Табела 8.6 Сезонски вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната есен и нивна споредба со функцијата mle во Matlab.....	182
Табела 8.7 Итеративна постапка за пресметка на сезонските вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната зима со метод на Newton.....	182
Табела 8.8 Сезонски вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната зима и нивна споредба со функцијата mle во Matlab.....	182
Табела 8.9 Часовни вредности на коефициентот на облик $k_{wei}$ .....	183
Табела 8.10 Часовни вредности на коефициентот на скалирање $c_{wei}$ .....	183
Табела 8.11 Податоци за термоелектраните за тест систем 1 .....	187
Табела 8.12 Податоци за оптоварувањето во системот за тест систем 1 .....	188
Табела 8.13 Евалуација на тест систем 1 .....	188
Табела 8.14 Оптимална бинарна комбинација на тест систем 1 .....	188
Табела 8.15 Оптимално решение на тест систем 1 .....	189
Табела 8.16 Споредба на добиените резултати за тест систем 1.....	189
Табела 8.17 Податоци за термоелектраните за тест систем 2 .....	190
Табела 8.18 Податоци за хидроелектраните за тест систем 2 .....	190
Табела 8.19 Податоци за оптоварувањето во системот за тест систем 2.....	190
Табела 8.20 Евалуација на тест систем 2 .....	190
Табела 8.21 Оптимално решение на тест систем 2 .....	190
Табела 8.22 Споредба на добиените резултати за тест систем 2.....	191
Табела 8.23 Податоци за термоелектраните за тест систем 3 .....	191
Табела 8.24 Податоци за хидроелектраните за тест систем 3 .....	191
Табела 8.25 Податоци за оптоварувањето во системот за тест систем 3.....	191

Табела 8.26	Евалуација на тест систем 3 .....	191
Табела 8.27	Оптимално решение на тест систем 3 .....	192
Табела 8.28	Споредба на добиените резултати за тест систем 3.....	192
Табела 8.29	Податоци за термоелектраните за тест систем 4 .....	192
Табела 8.30	Податоци за хидроелектраните за тест систем 4 .....	193
Табела 8.31	Податоци за компензаторите за тест систем 4.....	193
Табела 8.32	Податоци за јазлите за тест систем 4 .....	193
Табела 8.33	Податоци за преносната мрежа за тест систем 4.....	194
Табела 8.34	Податоци за оптоварувањето во системот за тест систем 4.....	195
Табела 8.35	Евалуација на тест систем 4 .....	195
Табела 8.36	Оптимално решение на тест систем 4 .....	195
Табела 8.37	Споредба на добиените резултати за тест систем 4.....	195
Табела 8.38	Податоци за термоелектраните за IEEE 30 bus system - DC модел..	196
Табела 8.39	Податоци за хидроелектраните за IEEE 30 bus system - DC модел (од mcf во m <sup>3</sup> ).....	196
Табела 8.40	Податоци за природниот доток на вода во акумулациите за IEEE 30 bus system.....	196
Табела 8.41	Податоци за јазлите за IEEE 30 bus system - DC модел.....	196
Табела 8.42	Податоци за преносната мрежа за IEEE 30 bus system - DC модел..	197
Табела 8.43	Податоци за оптоварувањето во системот за IEEE 30 bus system - DC модел.....	198
Табела 8.44	Евалуација на IEEE 30 bus system - DC модел.....	198
Табела 8.45	Оптимално решение на IEEE 30 bus system - DC модел .....	199
Табела 8.46	Податоци за термоелектраните за IEEE 30 bus system (AC модел)..	200
Табела 8.47	Податоци за хидроелектраните за IEEE 30 bus system - AC модел (од mcf во m <sup>3</sup> ).....	200
Табела 8.48	Податоци за оптоварувањето во системот за IEEE 30 bus system - AC модел.....	200
Табела 8.49	Евалуација на IEEE 30 bus system - AC модел.....	200
Табела 8.50	Оптимално решение на IEEE 30 bus system - AC модел (1 дел).....	201
Табела 8.51	Оптимално решение на IEEE 30 bus system - AC модел (2 дел).....	201
Табела 8.52	Оптимално решение на IEEE 30 bus system - AC модел (3 дел).....	202
Табела 8.53	Споредба на добиените резултати за IEEE 30 bus system .....	203
Табела 9.1	Податоци за термоелектраните за модифициран IEEE 30 bus system.....	206
Табела 9.2	Податоци за хидроелектраните за модифициран IEEE 30 bus system (од mcf во m <sup>3</sup> ).....	206
Табела 9.3	Податоци за компензаторите за модифициран IEEE 30 bus system...	206
Табела 9.4	Податоци за јазлите за модифициран IEEE 30 bus system.....	207
Табела 9.5	Податоци за преносната мрежа за модифициран IEEE 30 bus system .....	207
Табела 9.6	Податоци за природниот доток на вода во акумулациите за модифициран IEEE 30 bus system .....	209
Табела 9.7	Податоци за оптоварувањето во системот за модифициран IEEE 30 bus system .....	209
Табела 9.8	Податоци за ветроагрегатите на ветерната електрана за модифициран IEEE 30 bus system.....	209
Табела 9.9	Средни вредности за активната и реактивната моќност на ветерната електрана од симулирани 1000 сценарија .....	214
Табела 9.10	Евалуација на модифициран IEEE 30 bus system.....	214

Табела 9.11	Евалуација на излезните параметри на модифициран IEEE 30 bus system .....	214
Табела 9.12	Оптimalно решение на SHTWS за модифициран IEEE 30 bus system (1 дел).....	217
Табела 9.13	Оптimalно решение на SHTWS за модифициран IEEE 30 bus system (2 дел).....	217
Табела 9.14	Оптimalно решение на SHTWS за модифициран IEEE 30 bus system (3 дел).....	218
Табела 9.15	Оптimalно решение за напоните на јазлите $U_{NB}(pu)$ на SHTWS за модифициран IEEE 30 bus system .....	218
Табела 9.16	Оптimalно решение за фазните агли на јазлите $\theta_{NB}(^{\circ})$ на SHTWS за модифициран IEEE 30 bus system .....	220
Табела 9.17	Оптimalно решение за привидната моќност низ преносните водови $S_{GR,G}(MVA)$ на SHTWS за модифициран IEEE 30 bus system .....	222
Табела 9.18	Споредба на вкупните трошоци за работа на оптимизационите проблеми SHTS и SHTWS (моделирани со AC модел) .....	225
Табела 9.19	Интервали на веројатност на вкупните трошоци за работа за оптимизациониот проблем SHTWS.....	226

# ВОВЕД

---

---

Поглавје

1

## 1 ВОВЕД

Електроенергетскиот систем е еден од виталните и критични инфраструктури, бидејќи овозможува функционирање на сите останати инфраструктури. Електричната енергија може да се третира како срж на сите останати технолошки системи од секојдневниот живот. Со текот на времето и технолошкиот развој, оптималното производство на електрична енергија не само што придонесува за сигурноста и стабилноста на системот, туку и за намалување на трошоците за производство, а следствено и за економски раст на државата.

Годишната потрошувачка на електрична енергија по жител, заедно со показателите за емисијата и загадувачите, исто така треба да се земаат предвид при одлучувањето за развојот на која било земја. Истражувачите кои вршат планирање на електроенергетскиот систем во следните дваесет до тринаесет години, мора да ги земат предвид економските и експлоатационите аспекти при проектирањето на новите производни капацитети. Производните капацитети што се темелат на фосилни горива, при самиот технолошки процес на производство на електрична енергија, вршат емисија на штетни гасови и предизвикуваат глобално затоплување. Освен зголемувањето на глобалното затоплување, тие се одговорни и за намалување на природните енергенци, кои имаат и низа други намени. Поради тоа, а со цел заштеда на ваквите ресурси и зачувување на животната средина, потребно е да се користат и обновливи извори на енергија кои имаат нулта емисија. Меѓу сите обновливи извори на енергија, покрај хидроенергијата, ветерната енергија претставува најзастапен и најтестиран обновлив извор за производство на електрична енергија. Но, поради нејзината достапност во одредени моменти, кои се засноваат на стохастичка природа, мора да се користи заедно со хидроелектраните и термоелектраните.

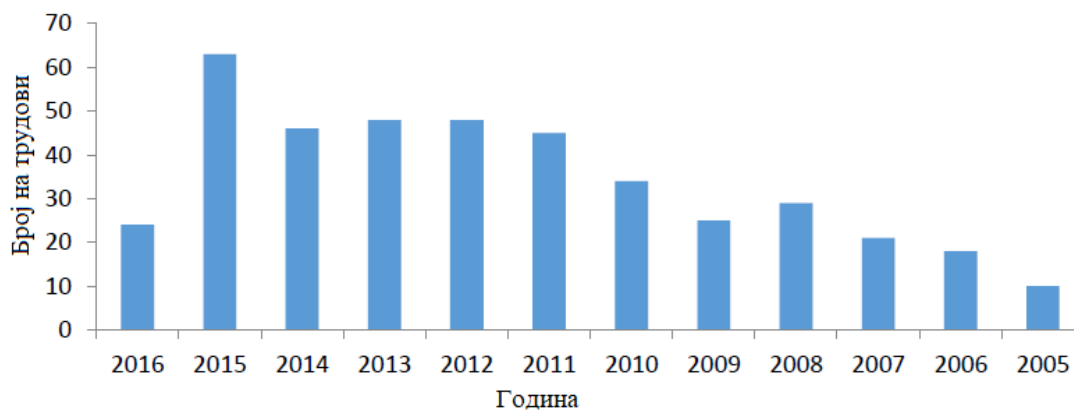
Оперативното планирање на електроенергетскиот систем се занимава со: краткорочно предвидување на потрошувачката во системот, избор на агрегатите во погон (unit commitment – UC), хидро-термо координација (hydrothermal scheduling – HTS), економска распределба на оптоварувањето помеѓу агрегатите во погон (economic dispatch - ED), регулација на напонот и регулација на фреквенцијата. Оптималното ангажирање на агрегати што се состои од UC и HTS, е еден од клучните чекори при оперативното планирање на електроенергетскиот систем, а претставува голем нелинеарен конвексен или неконвексен оптимизационен проблем, кој вклучува бројни ограничувања. Имајќи ја предвид сложеноста на проблемот, еволуциските, односно метахевристичките алгоритми (МА) се потенцијална методологија за решавање на овој оптимизационен проблем. Оваа докторска дисертација се занимава со истражување и придонес во краткорочната хидро-термо координација SHTS во комбинација со ветерната енергија (short-term hydro-thermal-wind scheduling – SHTWS), во која е имплементирана одредена непредвидливост на ветерната енергија, базирана на методот Монте Карло.

### 1.1 ПРЕГЛЕД НА ДОСТИГНУВАЊАТА НА НАУЧНАТА ДИСЦИПЛИНА ПОВРЗАНИ СО ПРЕДМЕТОТ НА ИСТРАЖУВАЊЕ

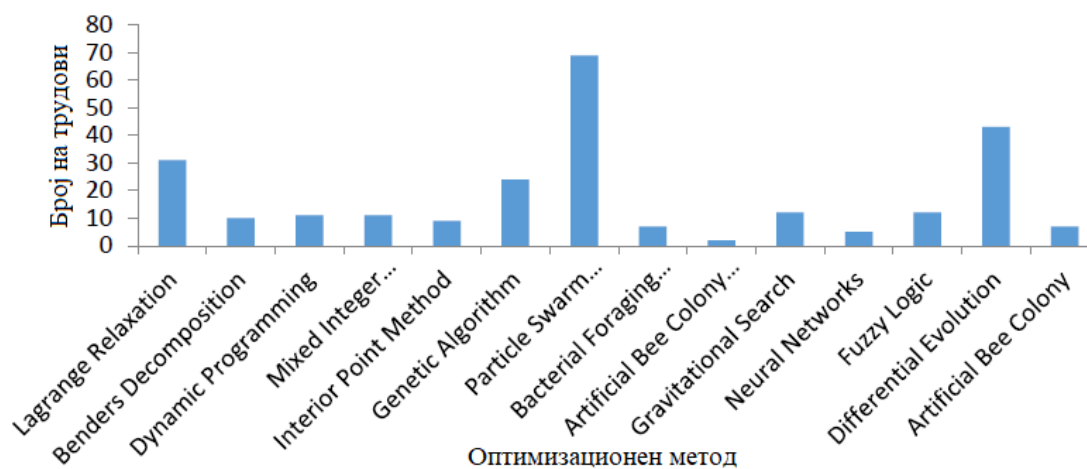
Во ова поглавје ќе биде прикажан детален преглед на МА коишто се предложени во светската литература за решавање на оптималната распределба на оптоварувањето помеѓу генераторите во сложен ЕЕС составен од хидроелектрани и термоелектрани. Проблемите на оптималната работа на електроенергетскиот систем, како и неговото планирање, се проучувани од страна на истражувачите, особено во последните неколку



децении, преку користење разни оптимизациони техники. I. A. Farhat и M. E. El-Hawary во [1] дале комплетен преглед на повеќето оптимизациони методи, применети за решавање на проблемот оптимална распределба на оптоварувањето помеѓу генераторите во сложен ЕЕС составен од хидроелектрани и термоелектрани т.е. краткорочна хидро – термо координација (*Short-term hydrothermal coordination problem* – SHTCP). Освен многуте научни трудови, некои докторски дисертации исто така се занимавале со примена на многу методи и техники, на оптимизациониот проблем SHTCP[2, 3]. За решавање на оптимизациониот проблем SHTCP се користени многу методи на математичко програмирање, итеративни постапки, методи од вештачката интелигенција, како и еволуциски, односно метахевристички алгоритми. Со развојот на новите метахевристички алгоритми, се земаат предвид и додатните детали на проблемот. На почетокот се земале предвид само термогенераторските единици т.е. термоелектраните, па ваквиот проблем се решавал како економски диспечинг. Во денешно време, во голем домен се проучува и топологијата на хидроелектраните т.е. нејзините ограничувања. На сликата 2.1 е прикажан бројот на објавени трудови за оптимизациониот проблем SHTCP, во периодот од 2005 до 2016 година, а на сликата 2.2 бројот на објавени трудови во согласност со применетиот оптимизационен метод.



Слика 1.1 Број на објавени трудови за оптимизациониот проблем SHTCP за периодот 2005 - 2016



Слика 1.2 Број на објавени трудови во зависност од применетиот оптимизационен метод

### 1.1.1 Класични градиентни методи

Под класични градиентни методи спаѓаат: градиентен метод, методот на Gauss-Seidel, методот на Newton-Raphson (NR), Simplex методот, како и Interior Point (IP) методот. Ваквите методи се претежно едноставни и лесни за програмирање, бидејќи се базираат на итерации во кои се вклучени само матриците Јакобијан и Хесијан. Овие методи служат за оптимизација само на едноставни, мали, диференцијабилни, континуирани и конвексни функции на цел, односно служат за определување на локалниот оптимум (кој кај конвексните функции е и глобален оптимум), но со значително брза конвергенција.

Во [4] е применет методот на Newton-Raphson (NR) за решавање на оптимизациониот проблем SHTCP. Но, овде се анализирани само едноставни и конвексни трошковни карактеристики на термогенераторските единици.

Во 1984, Karmarkar [5] го вовел Interior Point (IP) методот и оттогаш тој широко се применува во оптимизацијата. Во овој труд е констатирано дека за оптимизациони методи со големи димензии, Interior Point методот се карактеризира со поголема брзина споредбено со Simplex методот.

Interior Point методот во комбинација со методот на Gauss – Newton [6], бил применет од страна на M. Kleina, за решавање на Бразилскиот интерконективен ЕЕС. Методот се карактеризирал со добро време на пресметка, како и добри резултати.

Во 1997 година е спроведена студија која вршела компарација на неколку различни кодови (компјутерски алгоритми) базирани на Interior Point методот, со цел нивна примена на среднорочна хидро – термо координација МНТСП[7]. Воочени се предностите и недостатоците на комерцијалните и новопредложените научно-истражувачки кодови. За тестирање на сите овие кодови, како тест систем е користен Шпанскиот хидро – термо ЕЕС.

Во 1998 година е предложена метода за разделување на оптимизациониот проблем, базирана на Лагранжовата релаксација (LR). Проблемот на оптимални текови на моќност (Optimal Power Flow – OPF) во сложен хидро – термо ЕЕС, е разделен на два потпроблеми т.е. оптимални текови на моќност во ЕЕС составен од само хидроелектрани, односно само од термоелектрани [8]. Констатирано е дека ваквиот метод е прикладен за големи оптимизациони проблеми, а во голема мера ги редуцирал и потребите за меморија. Предложената метода прикажала брза конвергенција и брзи резултати.

Во 1999 година „clipping off“ методата (метод на „исклучување“) е комбинирана со Interior Point методот [9]. Главната предност на „clipping off“ методата била поставување на вредноста на управувачките променливи, на нивните горни и долни граници. Бројот на потребни итерации и обиди е редуциран, споредбено со стандардниот Interior Point метод. Од друга страна, се добиени идентични резултати. Тоа е првпат Interior Point методот да се користи во комбинација со „clipping off“ методата, за оптимизациониот проблем SHTCP.

Во 2000 година, RF Loyola извршил споредба на директните и индиректните методи за решавање на проблемот SHTCP со примена на програмски пакет [10]. Придонесот на трудот се заснова на постигнување квази-оптимално решение во временски прифатлив интервал. За да се постигне ваквото решение, бил применет пристап со комбинирање на директна и индиректна метода. Директниот Primal-Dual Interior Point метод е користен за декомпозиција на бинарните променливи за статусот

на термогенераторските единици, а индиректната метода т.е. Лагранжовата релаксација е користена за декомпозиција на примарниот проблем во хидро и термо потпроблеми. Методата Cutting plane е користена за максимизација на дуалната функција, а хидрогенераторските и термогенераторските единици се решени со примена на динамичко програмирање (DP). Резултатите покажале дека решенијата од двата пристапи се практично изедначени. Меѓутоа, Лагранжовата релаксација дала побрзо решение.

Во 2000 година, H.Weі го применил Interior Point методот за определување оптимални текови на моќност во ЕЕС составен од хидроелектрани и термоелектрани (Hydro-Thermal Optimal Power Flow – HTOPF) [11]. Алгоритмот бил тестиран на шест системи, од кои најголемиот се состоел од 1.047 јазли и оптимизационен период од 72 временски интервали. Било заклучено дека предложениот алгоритам е многу брз споредбено со останатите техники, но и дека поседува можност за решавање големи оптимизациони проблеми, каков што е HTOPF.

Во 2001 година, JLM Ramos предложил пристап со генетски алгоритам (GA) во комбинација со Interior Point методот [12]. Генетскиот алгоритам бил применет за определување на ON/OFF статусот на бинарните варијабли на термогенераторските единици, додека оптималното решение на каскадно поврзаните хидроелектрани и термоелектрани било добиено од Interior Point методот. Ограничувањето maximum up down ramps, како и билансот на вода во каскадно врзаните акумулации, исто така се земени предвид.

Претпоставката со којашто се поедноставува кривата на трошоци за гориво, преку занемарување на неконвексноста во кривата на трошоци на термогенераторските единици, предизвикана од секвенцијалното отворање на вентилите, во некои случаи може да доведе до значително неточни резултати, што има за последица големи загуби на приходите.

Овие класични градиентни методи имаат голем недостаток од аспект заробување на алгоритмот во некој локален минимум, бидејќи поради својата деривациона природа и неконвексниот дел од функцијата, никогаш не доаѓаат до глобалниот минимум. Поради неможноста за испорака на точни резултати во случај на комплицирани, големи, неконвексни и недиференцијабилни проблеми, нивната употреба е ограничена речиси само на теорија.

## 1.1.2 Детерминистички методи

Детерминистичките методи нудат мноштво различни методи за оптимизација, притоа базирани на одредена детерминистичка и математичка основа. Овие методи се базираат или на декомпозиција на проблемот односно релаксација, или пак на моделирање потпроблеми базирани на принципот на оптималност. Во овој дел се истакнати главните детерминистички методи, кои биле проучувани од истражувачите, со цел нивна примена на оптимизациониот проблем SHTCP. Во овој дел исто така накратко ќе бидат прикажани нивните предности и недостатоци.

### 1.1.2.1 Лагранжова релаксација и Бендерова декомпозиција

Во областа на математичката оптимизација, Лагранжовата релаксација е метода на релаксација т.е. апроксимација со разделување што тешкиот оптимизационен проблем со ограничувања го апроксимира т.е. прикажува преку поедноставен проблем. Со

користење на Лагранжовата релаксација, прекршувањето на ограничувањата од тип на неравенство се казнува, преку соодветен фактор на пенализација (фактор на казна / фактор на прекршок). проблемот на максимизација на Лагранжовата функција со дуални променливи, се нарекува Лагранжов дуален проблем.

Денес постојат различни оптимизациони техники што се напредни и компјутерски поефикасни од Лагранжовата релаксација. Сепак, таа сè уште наоѓа доста примена со цел задоволување на поставените ограничувања. Лагранжовата релаксација е најприкладна метода од категоријата техники во којашто припаѓа и ги задоволува ограничувањата на денешните оптимизациони проблеми. Коеволуциските техники се користат за пронаоѓање на минимумот кај ШТСП. Но, од друга страна, тие користат решение што е овозможено од Лагранжовата релаксација, со цел оптимизација на критериумската функција. Од друга страна, делумно се применуваат и напредни природно инспирирани техники, со цел наоѓање на глобалниот минимум и надминување на тешкотиите со кои се соочуваат и детерминистичките методи.

Техниките како што се линеарното и нелинеарното програмирање, генерално се најкористените техники за решавање на проблемот ШТСП. Техниките на формирање критериумска функција со Бендерова декомпозиција и Лагранжова релаксација, сè помалку се применуваат. Т. Forrest ја вовел методата на Лагранжова релаксација, во текот на решавањето на дуалниот проблем. Студијата покажала дека со ваквата метода можат да се добијат ветувачки резултати кај системите со голема димензионалност (large scale)[13]. Во оваа студија, формирањето на потпроблеми врз основа на изворниот проблем, се покажало како најефикасен пристап.

Потпроблемите што се добиваат од Лагранжовата релаксација, се линеарни функции. Решенијата на овој проблем претежно осцилираат околу своите оптимуми. Во 1994 година, Н. Yan користел техника на декомпозиција на проширената Лагранжова функција (Augmented Lagrangian) [14]. Додавањето на квадратен пенализационен израз на Лагранжовата функција, резултирало со осцилации, како и глатка функција на дуалниот проблем. Проширената Лагранжова функција во голема мера ги редуцирала овие осцилации, ја зголемила конвергенцијата и брзината на пресметка, но имала тенденција на оштетување на својствата на долните граници на променливите.

За да се справи со инхерентните осцилации на Лагранжовата релаксација, G. Xiaohong [15] во 1995 година, ја вовел методата на нелинеарна апроксимација. Поради ваквите осцилации, постои огромна разлика помеѓу решенијата добиени од поединечните потпроблеми и решението од примарниот проблем. За решавање на овие потпроблеми се користат нелинеарни функции, како на пример квадратна функција, што од друга страна придонесува и за избегнување на сингуларност на решението.

Во 1998 година методата на оптимална оддалеченост, којашто се базира на принципите на оптималност на Kuhn-Tucker, била употребена од страна на S. Ruzic и R. Rajakovic, со цел ажурирање на мултипликаторите [16]. Биле задоволени сите ограничувања и било добиено крајно решение многу близу до оптималното. Оваа метода дала подобри резултати во поглед на конвергенцијата и точноста, споредбено со субградиентната метода.

Во 1998 година, MS Salam предложил подобрена Лагранжова релаксација [17]. Лагранжовата релаксација била применета за да се задоволат потребите од резерва и побарувачката во системот. Оптимизациониот проблем бил декомпиран т.е. поделен на потпроблеми. За термо потпроблемот (термо диспечинг), било користено динамичко програмирање без дискретизација на нивото на генерации. Биле земени предвид

ограничувањето за биланс на моќности, ротирачка резерва, брзината на промена на оптоварувањето на генераторите (ramp rate), минимално време на вклучување/исклучување, како и загубите во мрежа. Новопредложената варијанта покажала подобри резултати споредбено со класичната Лагранжовата релаксација.

N. J. Redondo и A. J. Conejo во 1999 година, предложиле нова и неосцилирачка постапка [18]. Дуалниот проблем бил решен со примена на Лагранжова релаксација и покрај оригиналниот проблем. Дуалната грешка изнесувала само 0,3%. Трудот бил фокусиран на ажурирањето на Лагранжовите мултипликатори.

Во 1999 година, во [19] била предложена нова варијанта на Лагранжовата релаксација, за решавање на проблемот SHTCP со каскадно врзани резервоари кои се зависни од нето висинскиот пад. Биле разгледани неколку ограничувања како на пример, дискретни оперативни состојби, како и хидраулично поврзување на резервоарите.

Во 2000 година, Лагранжовата релаксација од страна на J. Ngundam [20], била користена за решавање на проблемот SHTCP со голема димензионалност. Проблемот вклучувал случајно избрана потрошувачка во системот, нелинеарна функција на трошоци, нелинеарна функција на влезно-излезната к-ка на хидроелектраните, како и каскадно врзани резервоари со вклучено ограничување за прелив од акумулациите.

S. Al-Agtash во 2001 година ја применил Лагранжовата релаксација со цел разгледување на преносното ограничување (ограничување за максималниот преносен капацитет на гранките од преносната мрежа) [21]. Преносното ограничување не било земено предвид при SHTCP, бидејќи сложеноста на проблемот значително се зголемила.

Во 2003 година, A. Borghetti го решил проблемот избор на агрегати (Unit Commitment – UC) во хидро-термо ЕЕС, преку Лагранжова хевристичка техника, со користење на резултатите добиени од дуалниот проблем [22].

Изборот на агрегати во хидро-термо ЕЕС е од голема важност за SHTCP. Реален пристап за проблемот хидро-термо UC бил прикажан во 2006 година, од страна на E. Finardi и E. L. da Silva [23]. Била користена bundle метода за ажурирање на Лагранжовите мултипликатори. За решавање на оптимизациониот проблем, Лагранжовата релаксација била комбинирана со линеарно програмирање, секвенцијално квадратно програмирање, како и мешано целобројно линеарно програмирање.

Во 2007 година, била применета Лагранжовата релаксација со променливо разделување (LRVS) на проблемот SHTCP, со земање предвид на преливот од акумулациите и одливот од турбините [24]. Ваквата метода не можела да најде прифатливо решение, па била применета проширена Лагранжова функција (Augmented Lagrangian – AL). Проблемот се карактеризирал со големи димензии, а бил со нелинеарна функција на трошоци, како и бинарни варијабли со статус ON/OFF за агрегатите.

Во 2009 година, L. Ruey-Hsun користел коеволуциска метода за решавање на проблемот SHTCP [25]. Оваа метода се состоела од два чекори. Најпрво, Лагранжовата функција била формирана со користење на примарното решение од Лагранжовата релаксација. Овој алгоритам истовремено користел два генетски алгоритми (GA) за еволуција на Лагранжовите мултипликатори. Управувачките променливи се ажурирани преку минимизација на фитнес функцијата, со користење на првата популација, додека максимизацијата била користена за адаптација на Лагранжовите мултипликатори од втората популација. Лагранжовите мултипликатори и управувачките променливи биле

истовремено ажурирани, а резултатите покажале дека предложената метода ефикасно го пронаоѓа оптималното решение.

Лагранжовата релаксација била предложена со комбинација на техника на вештачки променливи, од страна на FY Takigawa, во 2010 година [26]. Биле воведени нови можни променливи на ограничување. Ако математичкиот модел на хидроелектраните се моделира со нелинеарно програмирање, двофазниот пристап се прикажал како доста ефикасен. Лагранжовата релаксација ги ублажувала ограничувањата, но хидро потпроблемот сè уште не ги задоволувал очекувањата.

Конвергенцијата на Лагранжовата релакса не е задоволителна, поради инхерентните осцилации во дуалното решение. Проблемот е неконвексен, поради присутноста на мрежните ограничувања и целобројните променливи. Прекршените ограничувања не можат да бидат отстранети итеративно. Лагранжовата релаксација била користена во комбинација со линеарна апроксимација на прекршокот, со цел подобрување на дуалното решение и избегнување осцилации. Лагранжовиот проблем бил декомпозиран со користење на block descent coordination техника, од страна на C Liu, во 2010 година [27].

Лагранжова релаксација во комбинација со AL, била предложена во 2012 година од страна на RN Rodrigues [28]. Бидејќи Лагранжовата релаксација се соочува со тешкотии во пронаоѓањето на оптимално минимално решение поради, неконвексноста, нелинеарноста и комплексноста на оптимизациониот проблем, таа била применета во присуство на AL. Лагранжовата релаксација станала доста ефикасна, со користење на техниката на декомпозиција.

Во 2013 година, авторите во [29] предложиле нов пристап базиран на Бендерова декомпозиција (BD) за решавање на хидро-термо UC проблемот, моделиран со наизменичен AC модел на текови на моќност, како и безбедносни ограничувања. Предложената стратегија го раздвоила проблемот на стручен проблем и два потпроблеми. Стручниот проблем користи стратегија на бројно програмирање за решавање на проблемот UC, додека потпроблемите применуваат техника на нелинеарно програмирање за решавање на проблемот Економски диспечинг (ED), за секој временски интервал. Техниката е тестирана на IEEE 9-bus и IEEE 118-bus тестни системи. Добиените резултати покажуваат добра ефикасност на предложениот пристап.

#### 1.1.2.2 Динамичко програмирање

Во 2006 година е спроведено истражување за намалување на времето на пресметка со уважување на различните барања за ротирачка резерва во [30], а биле користени техники со комбинација на Multi-Pass динамичко програмирање (DP) и хибридно еволуциско програмирање (EP). Трудот вршел анализа на два типа ротирачка резерва и тоа, барања за ротирачка резерва поврзана со фреквенцијата, како и барања за моментална ротирачка резерва (хавариска резерва). Било користено Multi-PassDP, кое било брзо и барало помалку меморија за складирање, но барало решенија од дискретни вредности. За подобрување на перформансите, било користено EP, за добивање на оптималниот волумен на резервоарот, а од друга страна бил користен алгоритам со двојна филтрација за решавање на проблемите UC и термо ED.

Во 2011 година била изработена сеопфатна студија во врска со критериумот за запирање и начинот на семплирање, кај стохастично дуално динамичко програмирање (SDDP) [31]. Проблемот бил формулиран на тој начин како би се постигнала оптимална политика, при долгорочно планирање, во услови на неизвесност на хидроелектраните и

термоелектраните. Проблемот бил дефиниран како стохастички проблем со повеќе нивоа, а за него бил развиен соодветен алгоритам. Во студијата биле применети две методи, односно Quasi-Monte Carlo и хиперкубно семплирање, за семплирање и генерирање различни сценарија, во рамките на SDDP алгоритмот. Исто така, бил дискутиран и алтернативен критериум за формулирање критериуми за запирање на алгоритмот. Авторите ги тестирале овие идеи на проблем за тригодишно планирање, а како случај за анализа бил земен Бразилскиот електроенергетски систем.

KS Gjerden во 2015 година го решил проблемот SHTCP, со примена на SDDP [32]. Испитувањата покажале дека проблемот во врска со планирањето и оптимизацијата на хидроелектраните, во рамките на SHTCP, може да се реши со поврзување на SDDP методологијата. Меѓутоа, тоа можело да биде многу долготрајно споредбено со останатите пристапи за решавање на ваквиот проблем.

### 1.1.2.3 Мешано целобројно линеарно програмирање

Во 2001 година, GW Chang објавил труд во кој се опишани искуствата при решавањето на проблемот SHTCP, со мешано целобројно линеарно програмирање (MILP) [33]. SHTCP бил решен со помош на програмски пакет, кој вклучувал MILP солвер и алгебарски јазик за моделирање. Доколку оптимизациониот проблем SHTCP се решава со помош на MILP, може да се искористи линеарна апроксимација, со цел полесно додавање на нелинеарните критериумски функции, односно нелинеарните ограничувања, во оптимизациониот проблем. Биле опишани математички модели за двата типа производни капацитети, а биле детално моделирани акумулациони и пумпно-акумулациони хидроелектрани, следствено со нивните влезно-излезни карактеристики, минимални/максимални времиња на вклучување/исклучување, како и нивните хидраулични ограничувања.

## 1.1.3 Методи базирани на вештачка интелигенција

### 1.1.3.1 Невронски мрежи

Во 2003 година, M. Vasu применил Hopfield-ова вештачка невронска мрежа за оптимално предвидување на хидро-термо ЕЕС, со константен нето пад [34]. Била анализирана и економската распределба на оптоварувањето помеѓу хидроелектраните и термоелектраните. Се покажало дека се добиваат значително подобри резултати, односно на Њутновиот метод.

### 1.1.3.2 Fuzzy логика

Во 2009 година бил предложен адаптивен Neuro-Fuzzy Inference System (NFIS), паралелно со детерминистички оптимизационен модел, за оптимизација на проблемот SHTCP [35]. Предложениот пристап бил спореден со други оптимизациони техники, како на пример SDP, со користење податоци за речните дотоци кај хидроелектраните, а случај за анализа бил Бразилскиот електроенергетски систем. Резултатите за NFIS и SDP биле идентични.

Во 2012 година од страна на AL Rabelo, била предложена fuzzy- PSO техника за решавање на проблемот SHTCP [36]. Функцијата на сооднос за приказ на fuzzy системот била подесена со користење на PSO техника. Слично во [37], fuzzy базирана на GA за решавање на проблемот SHTCP. Принципот на fuzzy системот бил применет за

оптимално планирање на резервоарите кај хидроелектраните. Резултатите од симулацијата покажале ефикасност на предложената техника.

#### 1.1.4 Еволуциски и хибридни методи

##### 1.1.4.1 Генетски алгоритам

Во 2003 година е предложен модел за решавање на проблемот SHTCP, базиран на GA [38]. Предложениот алгоритам го поделил оптимизациониот проблем на два потпроблеми, односно UC и ED. Бил анализиран оптимизационен период од една недела, со временски интервали од по еден час. Перформансите на алгоритмот биле подобрени преку нова техника, којашто била користена за претставување на решенијата кандидати за минимум, како и со модификација на генетските оператори. Добиените резултати биле споредени со резултатите од Лагранжовата релаксација, со што се покажало дека GA е конкурентен на Лагранжовата релаксација.

Во 2004 година, Zoumas користил подобрен генетски алгоритам (EGA) со метода на приоритетна листа, за решавање на проблемот SHTCP [39]. SHTCP бил поделен на два потпроблеми. За решавање на термо потпроблемот бил користен метод на приоритетна листа, а хидро потпроблемот бил моделиран како нелинеарен оптимизационен проблем со случајни целобројни променливи, кој бил решен со помош на EGA. Во обзир биле земени хидро и термо ограничувањата. Перформансите на GA биле подобрени со прилагодување на специфичните генетски оператори. Главната предност на EGA била флексибилноста при моделирањето.

Leite во 2006 година, користел хибриден GA за оптимизација на Бразилскиот хидро-термо ЕЕС [40]. Исто така била направена споредба помеѓу GA и градиентната метода. Биле земени предвид речиси сите ограничувања од тип на равенство и неравенство. Предложениот хибриден алгоритам користел два нови генетски оператори, односно директна градиентна мутација и градиентна мутација. Хибридната техника прикажала прилично добри резултати.

Во 2007 година, S. Kumar и R. Naresh [41] го решиле проблемот SHTCP со неконвексна функција на трошоци, притоа со користење на генетски алгоритам кодиран со реални броеви (RGA). Биле земени предвид поголем број ограничувања од тип равенство и неравенство, како и времето на патување на водата помеѓу два каскадни резервоари, односно valve point ефектот во термоелектраните. Била направена споредба помеѓу генетски алгоритам кодиран со бинарни броеви (BGA) и RGA, која покажала дека RGA дава подобри резултати од BGA, а од друга страна RGA се карактеризирал со поедноставна имплементација, помала популација, како и поефикасно справување со ограничувањата без користење пенализациони фактори.

Во 2009 година, M. Kumar [42] го решил оптимизациониот проблем SHTCP, со примена на GA и оптимални текови на моќност (OPF) врз база на декомпозиција. Оптимизациониот проблем бил поделен на два потпроблеми. Термо потпроблемот бил решен со ламбда итеративната метода, со уважување на мрежните загуби. Што се однесува до хидро потпроблемот, истиот бил применет метод кај кој потрошената вода на хидроелектраните е пропорционална со потрошувачката во системот. За контрола на мрежните загуби бил користен OPF базиран на GA. Резултатите од применетиот метод за хидро потпроблемот биле споредени со резултатите од методот со среден расположлив доток (Average Inflow method - AIFM), а укажале дека предложениот метод е поедноставен и подоверлив.



J.Sasikala и M. Ramaswamy во 2010 година предложиле нова оптимизациона гама техника притоа користејќи GA, за подобрување на точноста, робусноста и брзината на пресметка на оптимизациониот проблем SHTCP [43]. Резултатите покажале дека предложената техника била брза и прецизна, но и со помала популација.

Оптимизациониот проблем SHTCP бил решен и од страна на VS Kumar и M. Mohan во 2011 година [44], со помош на GA. Како и обично, проблемот бил поделен на два потпроблеми, термо и хидро потпроблем. За решавање на термо потпроблемот била користена ламбда итеративна метода, а хидро потпроблемот бил решен со GA. Ограничувањето за минимален, односно максимален проток (празнење) низ турбината, како и мрежните загуби, биле исто така земени предвид при формирањето на OPF, врз база на GA. GA OPF се применувал во случај на прекршени ограничувања. За пресметка на мрежните загуби, бил применет метод со брзо раздвојување за пресметка на тековите на моќност. Предложената метода ја редуцирала сложеноста, времето на пресметка, а дала решение речиси како оптималното глобално решение.

Во 2011 година, проблемот SHTCP бил решен со примена на RGA [45]. Проблемот SHTCP се карактеризира со пробабалистичка природа и од други аспекти, како на пример потрошувачката во системот и природниот докот во резервоарите. Ваквите „несигурни“ параметри се третирали како случајни променливи. Биле земени предвид речиси сите ограничувања од типот на равенство и неравенство. За прекршување на ограничувањата била користена екстерна пенализациона функција.

Во 2013 година, MM Salama го решил проблемот SHTCP со константен нето пад и мрежни загуби, притоа со користење на GA во комбинација со constriction factor PSO (Particle Swarm Optimization – оптимизација со рој на честици) [46]. Предложената техника била тестирана на хидро-термо тест систем, со една хидроелектрана и три термоелектрани. Биле уважени повеќе хидролошки и термо ограничувања, како на пример, биланс на моќности, минимално односно максимално ниво на празнење (проток) низ турбината, како и ограничувањето за расположлива количина на вода. Резултатите од предложената техника се споредени со резултатите од GA, а било заклучено дека предложената техника дава исто решение како и GA, но со помало време на пресметка.

MM Salama во 2013 година, ја применил истата техника како во [46] за решавање на SHTCP, но со нелинеарна целна функција на трошоци [47]. Предложената метода била анализирана на хидро-термо тест систем кој се состоел од четири хидроелектрани и три термоелектрани. Биле земени предвид многу ограничувања, особено хидролошки, како на пример расположлив волумен на вода, водниот биланс во резервоарите и волуменот на резервоарот. Резултатите од симулацијата докажале дека PSO методата е далеку подобра од GA, во поглед на прецизноста и времето на пресметка.

Во 2014 година била предложена хибридна техника што ги комбинира Artificial fish swarm algorithm (AFSA) и RGA, со цел да се подобри ефикасноста и конвергенцијата [48]. AFSA има добра способност за пребарување и избегнување алгоритмот да биде заробен во некој локален оптимум.

#### 1.1.4.2 Particle swarm optimization

Во 2012 година, Y. Wang предложил подобрен self-adaptive PSO алгоритам [49]. Прераната конвергенција била избегната со промена на еволуцискиот пат на секоја честица. Со примена на новопредложениот алгоритам, биле земени предвид различни ограничувања. Ваквата техника била тестирана на систем од четири хидроелектрани и

четири термоелектрани. Резултатите покажале дека предложената техника е попрецизна и робусна, споредбено со останатите методи истакнати во трудот.

J. Zhang за првпат во 2012 година, предложил пристап базиран на PSO алгоритам со мала популација (Small Population-Based PSO - SPPSO)[50]. Во трудот бил користен нов оператор за мутација, со цел подобрување на разновидноста на популацијата, како и диференцијална еволуција (DE) за забрзување на процесот. Брзината на конвергенција била зголемена, но оптималното решение немало значајни подобрувања по многубројните повторувања. Разновидноста на честиците била задржана над посакуваното ниво, со помош на оператор за преселување. Сложените ограничувања од тип на равенство, биле третирано со посебна постапка. Техниката била тестирана на три хидро-термо ЕЕС и се покажало дека е ефикасна. Резултатите се споредени со различни еволуциски техники. Било заклучено дека SPPSO дава најдобро решение со помали напори, за помали ЕЕС.

V. Hinojosa и C. Leyton, во 2012 година мешано-бинарен еволуциски PSO алгоритам (Mixed-Binary Evolutionary Particle Swarm Optimizer - MBEPSO), за решавање на проблемот SHTCP [51]. Било констатирано дека резултатите биле подобрени, споредбено со GA, PSO и DP.

Во 2013 година, MM Salama предложил PSO алгоритам со „гушење“ на променливите, за решавање на проблемот SHTCP, со каскадно врзани хидроелектрани и нелинеарни функции на трошоци [52]. Предложената техника била тестирана на систем од три термоелектрани и четири термоелектрани. Исто така, уважени биле и повеќе ограничувања како на пример генераторското ограничување, ограничување на празнењето од турбината, почетниот и крајниот волумен на резервоарот, како и условот за биланс на вода во резервоарите. Резултатите биле споредени со различни техники, како на пример еволуциско програмирање (EP) и симулирано калење (SA), со цел докажување на изводливоста на техниката. Предложениот алгоритам постигнал оптимални трошоци за гориво, со пократко време на пресметка.

Во 2014 година, K. Dasgupta предложил пристап за решавање на проблемот SHTCP со резолуција од еден час, преку користење PSO алгоритам coinertia weight („инерциска тежина“) и constriction factor [53]. Формулацијата на проблемот вклучувала каскадно врзани хидроелектрани, како и ефектот на отворање на вентилите во термоелектраните т.е. неконвексна функција на трошоци со синусни компоненти. Авторот вршел разгледување на трошковните карактеристики на поединечните производни единици, наместо на еквивалентната термо единица. Резултатот покажал дека предложената техника е доста охрабрувачка и иновативна во споредба со другите техники.

За решавање на проблемот SHTCP, N. Narang во 2014 година применил друг пристап кој се базира на Predator prey based optimization (PPO) [54]. PPO припаѓа на групата популациони алгоритми, кои се базираат на јата односно роеви, а претставува добар алгоритам за решавање на нелинеарни и големи оптимизациони проблеми. Во PPO, претходно наведениот алгоритам PSO бил комбиниран со концепт на предаторски ефект, чијашто цел била избегнување прерана конвергенција, како и одржување разновидност на популацијата т.е. ројот. Ограничувањата од тип на равенство биле уважени, преку методот на елиминација на варијабли, кој врши експлицитно елиминирање на варијаблите. Елиминирањето варијабли потоа биле користени преку пенализационен пристап за ограничување на slack единиците во нивните граници. Условот за биланс на моќности во секој интервал бил овозможен со термо slack единицата, додека хидро slack единицата служела за задоволување на условот за биланс на водениот потенцијал во резервоарите. Предложената техника била применета на

хидро-термо тест системи со константен и варијабилан нето пад. Резултатите биле споредени со други постоечки техники и било покажано дека предложената техника дава подобри резултати.

Во 2015 година, Vinay Kumar Jadoun во [55] применил Dynamically Controlled PSO алгоритам за решавање на проблемот SHTCP. Ваквата техника била применета со уважување на повеќе ограничувања, како на пример ограничување на празнењето низ турбината, ограничување на капацитетот на резервоарот, почетен и краен волумен на резервоарот, условот за биланс на водниот потенцијал во резервоарот итн. Освен тоа, изведбата на ројот била модифицирана, со цел искористување на пребарувачкиот простор и подобро истражување. Предложената техника била тестирана на стандарден тест систем.

Во 2015 година, A. Rasoulzadeh-Akhijahani го решил проблемот SHTCP со примена на Modified Dynamic Neighborhood Learning based PSO (MDNLPSO) [56]. Честиците биле составени од различни соседства, а секоја честица учела само од своето посебно соседство. Информациите помеѓу честиците биле разменувани преку промена на соседството на честиците. Ова придонело за подобра експлицитност и истражување, споредено со базичниот PSO. Предложениот пристап е тестиран на три различни хидро-термо тест системи со каскадно врзани хидроелектрани, а резултатите биле споредени со останатите техники.

#### 1.1.4.3 Диференцијална еволуција

Во 2015 година, Jingrui Zhang го решил проблемот SHTCP со примена на подобрена диференцијална еволуција (DE) [57]. Во ваквиот пристап била вклучена и регенерација, со цел избегнување на локални оптимуми. Понатаму, ограничувањата биле третирани со нов механизам, со цел избегнување пристап со користење на пенализационен фактор, како и зголемување на ефикасноста на алгоритмот. Предложената техника била тестирана на хидро-термо тест систем, како би се потврдила ефикасноста на алгоритмот. Резултатите биле споредени со други популациони хевристички алгоритми.

Исто така, во 2015 година бил предложен подобрен Chaotic Hybrid DE алгоритам (ICHDE) за пронаоѓање оптимално решение на оптимизациониот проблем SHTCP, со уважување на многу практични ограничувања [58]. Chaotic теоријата била применета за самоприлагодување на параметрите на DE, а била вградена хаотична хибридна техника за локално пребарување, со цел ефикасно надминување на прераната конвергенција. Самоприлагоденото поставување на операторот за вкрстување е добиен со користење хаотичен оператор базиран на логичка мапа. Потоа, било извршено локално пребарување, со примена на chaotic hybridized local search (CHLS) mechanism (механизам за хаотично хибридизирано локално пребарување), со цел избегнување алгоритмот да заглави во некој локален оптимум.

#### 1.1.4.4 Gravitational search algorithm

N. Gouthamkumar во 2015 година, вршел оптимизација на проблемот SHTCP со примена на Disruption Based Gravitational Search Algorithm (DGSA), притоа уважувајќи ги генераторските ограничувања на хидроелектраните и термоелектраните, како и valve point ефектот т.е. ефект на отворање на вентилите во термоелектраните [59]. Со цел зголемување на ефикасноста на алгоритмот, во GSA а врз основа на астрофизиката, бил воведен disruption operator (оператор на „попречување“), кој бил задолжен за

зголемување на пребарувачката способност на алгоритмот. Условот за биланс на моќности и ограничувањето за крајниот волумен на вода во резервоарот кај хидроелектраните, биле уважени преку воведување ефективна стратегија. Предложениот алгоритам бил тестиран на два хидро-термо тест системи. Првиот се состоел од четири хидроелектрани и четири термоелектрани, а вториот тест систем имал четири хидроелектрани и три термоелектрани. Била направена анализа и споредба на резултатите, од која се констатирало дека DGSA се карактеризира со подобра конвергенција и точност, споредбено со GSA.

Во 2016 година, исто така, од страна на N. Gouthamkumar бил предложен Hybridized Gravitational Search Algorithm, за решавање на проблемот SHTCP [60]. Концептот oppositionbased learning бил вграден во GSA со цел подобрување на квалитетот на решенијата, а за забрзување на конвергенцијата на решенијата бил вграден disruption operator (оператор на „попречување“). Предложениот алгоритам бил тестиран на два тест системи. Првиот се состоел од четири хидро и четири термо единици, а другиот четири хидро и три термо единици, но со вклучен valve point ефект.

#### 1.1.4.5 Simulated annealing и Tabu search

Во 2011 година, V. Ferreira и G. Silva го решиле оптимизациониот проблем SHTCP, со примена на Simulated annealing (SA) алгоритам (алгоритам на симулирано калење) [61]. Била направена детална споредба помеѓу GA и SA, за решавање на SHTCP. Резултатите укажале дека двете техники се подеднакво прикладни.

NC Nayak и SSA Rajan во 2013 година претставиле техника на еволуциско програмирање што се базира на Tabu Search (TS) алгоритмот [62], за решавање на хидро-термо UC проблемот. UC проблемот во предложената техника бил кодиран како низа симболи. Почетната популација била генерирана по случаен пат, од претходно дефинирано множество решенија. TS одржува краткорочна меморија на најновите решенија што му помага да избегне заробување во некој локален минимум. Структурата на меморијата му помага на TS во спречувањето на одредени движења што можат да го намалат квалитетот на оптималното решение. Од друга страна, Tabu статусот се поништува доколку се исполнети, кои се изразени во облик на аспирационо ниво т.е. aspiration level (AL). TS станува пофлексибилен со користење на AL техниката, бидејќи таа го насочува пребарувањето кон атрактивните решенија. Предложената техника била споредена со класичните методи, односно DP и Лагранжова релаксација од аспект на трошоците за гориво, како и времето на пресметка.

#### 1.1.4.6 Cuckoo search algorithm

Во 2018 година, од страна на TT Nguyen, BH Dinh, NV Quynh, MQ Duong и LV Dai бил предложен Effective Novel Cuckoo Search Algorithm (ENCSA), за решавање на проблемот SHTS [63]. Во оптимизациониот проблем бил применет AC модел за пресметка на тековите на моќност, но била уважена само конвексна критериумска функција т.е. без valve point ефектот, без сигурносното ограничување ramp rate. Од друга страна, не биле уважени и хидролошките ограничувања за почетен и краен волумен во акумулациите. Предложениот алгоритам бил тестиран на два тест системи, односно IEEE 30 и IEEE 118 buses power system.

Во 2020 година, TT Nguyen, LH Pham, Mohammadi и LC Kien примениле Modified Adaptive Selection Cuckoo Search Algorithm за решавање на оптимизациониот проблем SHTS, со имплементирана ветерна енергија, т.е. SHTWS[64]. Во овој алгоритам биле

имплементирани различни ограничувања, но не и сигурносните ограничувања како на пример ограничувањето на брзината за промена на моќноста на генераторите т.е. ramp rate, ограничувањето на напоните на јазлите, односно ограничувањето за преносната моќ на водовите. Што се однесува до ограничувањето за биланс на моќности, земени се предвид само активните моќности на генераторите. Прикажан е и соодветен метод за моделирање на стохастичноста на ветерната енергија. Ваквата техника била тестирана на систем од четири хидроелектрани, четири термоелектрани и две ветерни електрани. Резултатите укажуваат на нешто подобра конвергенција, во однос на класичниот Cuckoo Search Algorithm.

### 1.1.5 Дискусија за претходните истражувања

Врз основа на деталниот преглед на литературата кој беше претходно истакнат, јасно се гледа нелинеарноста, неконвексноста и динамичната природа како на критериумската функција, така и на ограничувањата, на оптимизациониот проблем SHTWS. Методите за оптимизација се класифицираат врз основа на видот на пребарувачкиот простор и критериумската функција, заедно со ограничувањата од тип на равенство и неравенство. Генерално, критериумската функција и/или ограничувањата содржат нелинеарност, којашто на оптимизациониот проблем му дава нелинеарен карактер. Оптималното планирање на сложениот ЕЕС составен од термоелектрани, хидроелектрани и ветерни електрани, главно е сложен програмски проблем, кој вклучува нелинеарна критериумска функција, како и комбинации од линеарни и нелинеарни ограничувања. Целта на оптимизацијата на погонот на ЕЕС составен од термоелектрани, хидроелектрани и ветерни електрани е економска распределба на оптоварувањето помеѓу генераторите во хидроелектраните и термоелектраните, во зависност од излезната моќност на ветерната електрана, но со истовремено задоволување на различни ограничувања. Ограничувањата од типот на равенство го вклучуваат условот за биланс на моќности, како и условот за расположлива количина на вода во резервоарите на хидроелектраните.

Проблемот SHTWS се класифицира како конвексен или неконвексен оптимизационен проблем, кој всушност претставува сложена надоградба на SHTCP. Кај конвексниот SHTWS или SHTCP, влезно-излезните карактеристики се прикажуваат со квадратни функции или се врши нивна линеарна апроксимација. Во овој случај можат да се применат оптимизациони алгоритми што се темелат на математичко програмирање.

Во минатото, многу од истражувачите користеле конвексна критериумска функција за решавање на оптимизациониот проблем SHTCP, додека valve point ефектот кој предизвикува неконвексност, како и мрежните загуби, не се уважени од страна на многу истражувачи. Од друга страна, не било извршено и истовремено уважување на билансот на моќности моделиран со AC модел, мрежните загуби, ограничувањето од страна на преносната мрежа, ограничувањето за ротирачка резерва и максимално дозволената промена на оптоварувањето на генераторите за некој краток интервал т.е. ramp rate limit, имајќи го предвид фактот дека ова значително го комплицира алгоритмот и ја доведува до прашање неговата изводливост, но од друга страна дава значително повисоко квалитетно и физички прифатливо решение. Недоволно квалитетното физичко оптимално решение може да ја намали стабилноста и доверливоста на системот, бидејќи поголемата грешка за предвидените оптимални моќности на генераторите бара значително поголема ангажирана ротирачка регулациона резерва за нејзина компензација, со што и директно влијае на трошоците за работа.

Во реален случај, SHTWS е исклучиво нелинеарен, неконвексен и сложен оптимизационен проблем. Таквите проблеми бараат брза, точна и робусна методологија на решавање, бидејќи некои методи базирани на математичко програмирање не можат лесно да се справат со нив. Генерално, еволуциските методи се користат како алат за решавање на сложените оптимизациони проблеми, поради нивните способности да ги надвладаат недостатоците на традиционалните методи. Еволуциските методи имаат низа ексклузивни вредности како на пример: робусноста и подоверливите перформанси, глобалната можност на пребарување, малата потреба за информации, паралелната работа, како и фактот дека не бараат диференцијабилни и континуирани целни функции.

Освен пристапите базирани на традиционални методи, биле применети и неколку еволуциски алгоритми како би се дошло до оптималното решение на проблемот SHTSP. Овие пристапи во некои случаи се покажале како поефикасни и имале поголема „привлечност“ кај истражувачите, поради нивната робусност и способност да пронајдат разумно прифатливо решение. Меѓутоа, овие методи страдаат т.е. имаат голем недостаток од прерана конвергенција [65], а исто така голем дел од овие методи бараат преголемо време на пресметка, особено за оптимизациониот проблем SHTWS со голема димензионалност (large scale). Од друга страна, наведениот оптимизационен проблем SHTWS, заедно со стохастичноста на ветерната енергија, како и претходно споменатите ограничувања што ќе бидат моделирани во идните поглавја, досега не бил предмет на анализа и истражувања од страна на научната сфера.

Имајќи го предвид наведеното, истражувачите предлагале пристап со примена на еволуциските методи, но со некои измени или подобрувања на нивните основни параметри, или пак нивна хибридизација со кој било друг конвенционален/неконвенционален метод.

### **1.1.6 Преглед на достигнувањата на кандидатот во научната дисциплина поврзани со предметот на истражување**

Истражувањата на кандидатот поврзани со предметот на истражување, започнуваат во 2020 година, кога од страна на В. Postolov и SN Poseva бил предложен Primal-Dual Interior Point (PDIP) algorithm, за решавање на проблемот SHTS [66]. Оптимизациониот проблем бил решаван со конвексна критериумска функција, а бил применет DC модел за пресметка на тековите на моќност. Биле уважени ограничувањата за биланс на моќности, моќностите на генераторите, расположливата количина на вода во акумулациите, како и ограничувањето за преносната мрежа. Со алгоритмот PDIP била формирана Лагранжова функција со додавање внатрешна (бариерна) пенализациона функција, а сите ограничувања од типот неравенство биле претворени во ограничувања од типот равенство. Притоа, за решавање на Лагранжовата функција бил применет итеративниот метод на Newton. Ефикасноста на предложениот PDIP algorithm била претходно тестирана на различни хидро-термални системи, а потоа бил применет на Modified IEEE 30 Bus systems. Главната цел на трудот била истакнување на влијанието на ограничувањето за преносните водови врз трошоците за работа на термоелектраните, т.е. дека е неопходно тоа да биде вклучено во математичкиот модел на SHTS.

Во 2020 година, В. Postolov и А. Iliev примениле бинарен Adaptive Genetic Algorithm (AGA), за решавање на оптимизациониот проблем Hydro-thermal Unit Commitment, со неконвексна критериумска функција т.е. уважување на valve point effect, како и DC модел за пресметка на тековите на моќност [67]. Во наведениот алгоритам, истовремено биле уважени различни ограничувања, меѓу кои и сигурносните ограничувања, односно ограничувањата за биланс на моќности, моќностите на

генераторите, расположливата количина на вода во акумулациите, преносната мрежа, ротирачка резерва, брзината на промена на моќноста на генераторите т.е. ramp rate, како и расположливото производство од електраните. Бил предложен нов repair mechanism за справување со ограничувањата кај бинарните хромозоми, кој се базира на принципот на приоритетна листа. Предложениот алгоритам бил тестиран на IEEE 30 BUS test system. Резултатите укажуваат на подобри перформанси, во однос на предложените алгоритми во споменатите референци.

Во 2021 година, В. Postolov и А. Iliev предложиле Genetic Algorithm (GA) со два нови механизма за справување со ограничувањата, за решавање на оптимизациониот проблем Security Constrained Hydrothermal Unit Commitment (SCHTUC), при различни хидролошки сценарија. Оптимизациониот проблем се карактеризирал со неконвексна критериумска функција, како и DC модел за тековите на моќност [68]. Во алгоритмот, истовремено биле уважени ограничувањата за биланс на моќности, моќностите на генераторите, расположливата количина на вода во акумулациите, преносната мрежа, минималното време на вклучување и исклучување на електраните, ротирачка резерва, брзината на промена на моќноста на генераторите т.е. ramp rate, расположливото производство од електраните, како и билансот на вода во акумулациите. Бил предложен нов repair mechanism за справување со ограничувањата кај бинарните хромозоми, кој се базира на принципот на приоритетна листа. Предложениот алгоритам бил применет на систем IEEE 30 Bus System од хидроелектрани и термоелектрани, при различни хидролошки услови т.е. расположлив волумен на вода во акумулациите, со цел докажување на хипотезата дека вкупните трошоци за работа значително зависат од хидролошките услови, т.е. од расположливиот волумен вода и дотоците во акумулациите на хидроединиците. Ефикасноста на предложениот алгоритам била тестирана на референтен тест-систем, со други хибридни метахеуристички методи, како што се PSO – GWO и DA-PSO, при што било утврдено дека предложениот алгоритам дава подобри перформанси споредено со споменатите метахеуристички методи.

Во 2022 година, В. Postolov и А. Iliev предложиле бинарно-реален Adaptive Genetic Algorithm (AGA), за решавање на оптимизациониот проблем Security Constrained Hydrothermal Unit Commitment (SCHTUC) [69], кој всушност претставува надоградување на алгоритмот предложен во [68]. Оптимизациониот проблем се состоел од неконвексна критериумска функција, во целина со трошоците за старт, како и DC модел за тековите на моќност. Алгоритмот се состоел од два дела, односно прва фаза UC кој се решавал со бинарно-кодиран GA, како и втора фаза SHTS кој се решавал со реално кодиран GA. Во алгоритмот биле моделирани ограничувањата за биланс на моќности, моќностите на генераторите, расположливата количина на вода во акумулациите, преносната мрежа, минималното време на вклучување и исклучување на електраните, ротирачка резерва, брзината на промена на моќноста на генераторите т.е. ramp rate, забранети оперативни зони, расположливото производство од електраните, како и билансот на вода во акумулациите. Биле имплементирани две нови стратегии за вкрстување и мутација, за задржување на диверзитетот на популацијата. Предложениот алгоритам најпрво бил применет на тест систем од 6 термоелектрани, кој потоа бил решен и со методот на Newton. По доказот дека критериумската функција е конвексна и дека со методот на Newton се добил глобалниот оптимум, а имајќи ја предвид споредбата на резултатите и отстапувањата, се дошло до констатација дека предложениот алгоритам дава глобален оптимум. Ефикасноста на предложениот алгоритам била тестирана на истиот тест-систем, со други метахеуристички методи, како што се PSO – GWO и DA-PSO, при што било утврдено дека предложениот алгоритам дава подобри резултати

споредбено со споменатите метахевристички методи. На крајот, предложениот алгоритам бил применет на IEEE 30 Bus System од хидроелектрани и термоелектрани.

Што се однесува до главниот проблем кој е предмет на докторската дисертација, односно SHTS, во 2021 година В. Postolov, А. Iliev, D. Dimitrov и N. Dimishkoska, предложиле Self Adaptive Genetic Algorithm (SAGA) with PTDF (Power Transfer Distribution Factor), за решавање на проблемот N-1 Security-Constrained Short-term Hydrothermal Scheduling (SCSHTS) [70]. Предложениот алгоритам претставува надоградување на алгоритмот предложен во [69], односно тој ги поседува сличните карактеристики и ограничувања споредбено со алгоритмот во [69], но е надграден со имплементација на статички адаптивен пенализационен фактор т.е. self-adaptive penalty, како и нов repair mechanism. Главната цел на истражување била доказ дека вкупните трошоци за работа многу зависат и од испадот на генераторските единици. Ефикасноста на SAGA била верифицирана на тест-систем, по споредбата на резултатите со други метахевристички методи, како што се AIS, DE и EP, при што било констатирано дека предложениот SAGA се карактеризира со подобри перформанси споредбено со споменатите алгоритми, кои претходно биле применети. На крај, предложениот алгоритам бил применет на IEEE 30 Bus System од хидроелектрани и термоелектрани, при што биле симулирани повеќе N-1 сценарија, односно испад на секоја од шесте генераторски единици.

Во 2022 година В. Postolov, N. Hinov, А. Iliev и D. Dimitrov, предложиле нова варијанта на Self Adaptive Genetic Algorithm (SAGA), за решавање на проблемот Short-Term Hydro-Thermal-Solar Scheduling (SHTSS) with CCGT [71]. Предложениот алгоритам претставува надоградување на алгоритмот предложен во [70], односно во него бил имплементиран нов оператор за вкрстување т.е. Laplace Crossover (LX), како и нов repair mechanism во кој биле имплементирани и хидролошките ограничувања. Биле уважени и ограничувањата за почетен и краен волумен на вода, минимален и максимален проток, како и минимален и максимален волумен на вода. Во алгоритмот, а непосредно пред главната генетска постапка, била предложена и постапка за селекција на најдобрите хромозоми со примена на constraint handling technique, која се базира на superiority of feasible solutions. Предмет на истражување била оптималната работа на системот со интегрирана термоелектрана со комбиниран циклус (CCGT) и соларна електрана, односно нивното влијание врз вкупните трошоци за работа. Било истражувано и влијанието на локацијата на градба на соларната електрана врз трошоците за работа и приликите во системот. Ефикасноста на SAGA била верифицирана со два тест-системи, преку споредба на резултатите со други метахевристички техники, како што се AIS, DE, EP, DA-PSO и PSO-GWO, при што било констатирано дека предложениот SAGA нуди подобри перформанси споредбено со претходно предложените алгоритми. На крајот, предложената нова варијанта на SAGA била применет на IEEE 30 Bus System, составен од хидроелектрани и термоелектрани, CCGT и соларна електрана.

Во 2022 година В. Postolov, А. Iliev, D. Dimitrov, А. Causevski и S. Nikolova-Poceva, предложиле Novel Self-adaptive Genetic Algorithm моделиран со AC модел (NSAGA), за решавање на проблемот AC Security Constrained Short-term Hydrothermal Scheduling (SCSHTS) [72]. Предложениот алгоритам претставува надоградување на алгоритмот предложен во [71], односно во него бил имплементиран AC модел за пресметка на тековите на моќност, со примена на методот на Newton-Raphson за пресметка на напони, како и нов стохастички пристап за вкрстување. Покрај ограничувањата за почетен и краен волумен на вода, минимален и максимален проток, како и минимален и максимален волумен на вода, истовремено биле уважени ограничувањата кои



произлегуваат од АС моделот за пресметка на тековите на моќност т.е. биланс на активни и реактивни моќности, минимална и максимална активна, односно реактивна моќност на генераторите, минимален и максимален напон на генераторите и јазлите, како и минимална и максимална реактивна моќност на компензаторите. Освен истовремено уважување на претходно споменатите ограничувања, биле предложени и 5 нови механизми за справување со ограничувањата (constraint handling repair mechanisms), односно механизам за справување со ограничувањата за хидроелектраните, за справување со ограничувањето за реактивната моќност на компензаторите, за справување со ограничувањето за напоните на PQ јазлите, за справување со техничките граници на реактивните моќности и напоните на генераторите, како и за справување со ramp rate ограничувањето на генераторите. Со цел верификација на ефикасноста и ефективноста на предложениот алгоритам, тој бил применет на benchmark верзијата на IEEE 30 Bus System, кој се состоел од хидроелектрани, термоелектрани и два интервали. Резултатите биле споредени со претходно предложените метахеурстички методи за овој проблем, односно Conventional Cuckoo Search Algorithm (CCSA), Effective Novel Cuckoo Search Algorithm (ENCSA), и Modified Cuckoo Search Algorithm (MCSA), по што било констатирано дека предложениот алгоритам се карактеризира со подобри перформанси и испорачува помала вредност за вкупните трошоци за работа. На крајот, NSAGA бил применет на стандардниот IEEE 30 Bus System со АС модел, составен од хидроелектрани и термоелектрани.

Во 2022 година, односно во [73, 74] Б. Постолов и А. Илиев предложиле друга варијанта на NSAGA, за решавање на проблемот Краткорочна хидро-термо координација моделирана со АС модел со уважување на сигурносните ограничувања. Предложениот алгоритам претставува модификација на алгоритмот предложен во [72], односно бил имплементиран поразличен пристап за вкрстување т.е. Heuristic Crossover (HX), како и поразличен пристап за мутација односно Non-uniform mutation (NUM). Биле моделирани и истовремено уважени сите ограничувања, како и во [72]. Предмет на истражување било однесувањето на различните оператори за вкрстување и мутација, врз генетската пресметка односно вкупните трошоци за работа. Со цел верификација на ефикасноста и ефективноста на предложениот алгоритам, тој бил применет на benchmark верзијата на IEEE 30 Bus System, кој се состоел од хидроелектрани, термоелектрани и два интервали. Предложениот алгоритам бил спореден со Conventional Cuckoo Search Algorithm (CCSA), Effective Novel Cuckoo Search Algorithm (ENCSA), и Modified Cuckoo Search Algorithm (MCSA), по што повторно било констатирано дека и ваквата варијанта на NSAGA дава подобри перформанси и подобри резултати за вкупните трошоци за работа. Следствено на тоа, NSAGA бил применет на стандардниот IEEE 30 Bus System со АС модел, составен од хидроелектрани и термоелектрани.

## 1.2 ФОРМУЛАЦИЈА НА ИСТРАЖУВАЧКИОТ ПРОБЛЕМ

Оптималното користење на хидроелектраните и термоелектраните е клучно за решавање на проблемот хидро-термо координација (HTS). Во зависност од временскиот период, чијашто резолуција може да изнесува час, ден, месец или пак година, HTS може да се класифицира како краткорочна хидро-термо координација т.е. short-term hydrothermal scheduling (SHTS), среднорочна хидро-термо координација т.е. mid-term hydrothermal scheduling (MHTS), и долгорочна хидро-термо координација т.е. long-term hydrothermal scheduling (LHTS). SHTS претставува едно од активните подрачја на истражување, во подрачјето оптимизација на електроенергетските системи, каде што се

дефинира оптимална координирана работа на хидроелектраните и термоелектраните во некој временски период, зависно од расположливоста на водата за погон на хидроелектраните. Оптималниот погон на хидроелектраните е важна задача, поради достапноста и користењето на водата во различните временски интервали. Со SHTS се влијае и на економските и на еколошките аспекти на електроенергетскиот систем, бидејќи таа одлучува за оптималниот удел, односно погонот на термоелектраните, зависно од достапноста или недостапноста на водната енергија. За економските и еколошките аспекти на електроенергетскиот систем, одговорни се само термоелектраните. Бидејќи трошоците за работа на хидроелектраните се занемарливи, целната т.е. критериумската функција на SHTS, се сведува само на минимизација на трошоците за гориво на термоелектраните, (или пак на вкупните трошоци за работа доколку пред SHTS се изврши нивно ангажирање т.е. UC) под присуство на голем број ограничувања. Поради силната меѓусебна корелација помеѓу ограничувањата, SHTS претставува исклучително сложен, нелинеарен, динамички и неконвексен оптимизационен проблем.

Врз основа на деталниот преглед на литературата кој беше претходно истакнат, јасно се гледа нелинеарноста, неконвексноста и динамичната природа како на критериумската функција така и на ограничувањата, на оптимизациониот проблем SHTS. Методите за оптимизација се класифицираат врз основа на видот на пребарувачкиот простор и критериумската функција, заедно со ограничувањата од тип на равенство и неравенство. Генерално, критериумската функција и/или ограничувањата содржат нелинеарност, којашто на оптимизациониот проблем му дава нелинеарен карактер. SHTWS претставува надоградба на SHTS, т.е. економска распределба на оптоварувањето помеѓу хидроелектраните и термоелектраните, со истовремено задоволување на различни ограничувања, како и уважување на излезната моќност од ветерните електрани заедно со нејзината непредвидливост т.е. стохастичност. Ограничувањата од тип на равенство го вклучуваат условот за биланс на моќности, условот за расположлива количина на вода во резервоарите на хидроелектраните, како и условот за биланс на водниот потенцијал во акумулациите. Во зависност од применетиот модел за пресметка на текови на моќност, ограничувањето за биланс на моќности вклучува биланс на активни моќности (DC модел), односно биланс на активни и реактивни моќности (AC модел). Ограничувањата од тип неравенство го вклучуваат генераторското ограничување, ограничувањето за брзината на промена на моќност на генераторите т.е. ramp rate, ограничувањето за можно производство, ограничувањето за преносната моќ на водовите, ограничувањето за напонот на јазлите во системот, ограничувањето за ротирачка резерва, ограничувањето за минимален и максимален проток низ турбините, ограничувањето за почетен и краен волумен на вода, како и ограничувањето за минималниот и максималниот капацитет на резервоарот.

Што се однесува до SHTS, тој се класифицира како конвексен или неконвексен оптимизационен проблем. Кај конвексниот SHTS, влезно-излезните карактеристики се прикажуваат со квадратни функции или се врши нивна линеарна апроксимација. Во овој случај можат да се применат оптимизациони алгоритми, кои се темелат на математичко програмирање.

Во минатото, многу од истражувачите користиле конвексна критериумска функција за решавање на оптимизациониот проблем SHTS, додека valve point ефектот кој предизвикува неконвексност, мрежните загуби, AC моделот, ограничувањето за можно производство, ограничувањето за преносната моќ на водовите, ограничувањето за напонот на јазлите во системот, итн. не се уважени од страна на многу истражувачи.

Од друга страна, не било извршено истовремено уважување на сите претходно споменати ограничувања, имајќи го предвид фактот дека ова значително го комплицира алгоритмот и ја доведува до прашање неговата изводливост, но од друга страна дава значително поквалитетно и физички прифатливо решение. Недоволно квалитетното физички оптимално решение може да ја намали стабилноста и доверливоста на системот, бидејќи поголемата грешка за предвидените оптимални моќности на генераторите бара значително поголема ангажирана ротирачка регулациска резерва за нејзина компензација, со што и директно се влијае на трошоците за работа.

Во современите сложени електроенергетски системи, каде сè повеќе е застапена енергијата од обновливи извори, во согласност со ЕУ директивите, SHTS се трансформира во SHTWS, којшто е исклучиво нелинеарен, неконвексен и сложен оптимизационен проблем, имајќи предвид дека тој претставува надоградба на SHTS, како што беше спомнато. SHTWS бара брза, точна и робусна методологија на решавање, бидејќи методите базирани на математичко програмирање и градиентните методи воопшто не се применливи кај овој оптимизационен проблем. Генерално, како алат за решавање на сложените оптимизациони проблеми се користат метахевристичките алгоритми, поради нивните способности да ги надвладаат недостатоците на традиционалните методи. Метахевристичките алгоритми имаат низа ексклузивни вредности како на пример робусноста и подоверливите перформанси, глобалната можност на пребарување, малата потреба за информации, паралелната работа, како и фактот дека не бараат диференцијабилни и континуирани целни функции. Биле применети неколку метахевристички алгоритми како би се дошло до оптималното решение на проблемот SHTS. Овие пристапи во некои случаи се покажале како поефикасни и имале поголема „привлечност“ кај истражувачите, поради нивната робусност и способност да пронајдат разумно прифатливо решение. Меѓутоа, овие методи страдаат т.е. имаат голем недостаток од прерана конвергенција [65], а исто така голем дел од овие методи бараат преголемо време на пресметка, особено за оптимизациониот проблем SHTWS, кој се карактеризира со голема димензионалност (large scale).

### 1.3 ПРЕДМЕТ НА ИСТРАЖУВАЊЕ

Предмет на истражување на докторската дисертација е развој на нов современ модел на бинарен и реален генетски алгоритам (чијашто намена е решавање на UC и SHTWS респективно), како и евалуација на нивните перформанси при примена на неколку современи техники за справување со ограничувањата т.е. constraint handling techniques, за решавање на оптимизациониот проблем SHTWS. Оптимизациониот проблем SHTWS со сите негови ограничувања, се решава со примена на нов генетски алгоритам (GA) со статички адаптивен пенализационен фактор и стохастичко рангирање т.е. Novel Self-Adaptive Genetic Algorithm (NSAGA), а резултатите се анализираат и споредуваат со претходните истражувања, достапни во литературата. Имајќи ги предвид ЕУ директивите и структурата на современите електроенергетски системи, предложена е нова формулација за решавање на стохастичка SHTWS што ја вклучува стохастичноста на ветерната енергија. Ваквата стохастичност во оваа докторска дисертација е моделирана со методот Монте Карло. Понатаму, неопходно е уважување на сите потребни сигурносни и системски ограничувања, со цел добивање реално и физички прифатливо решение. Бидејќи метахевристичките алгоритми (MA) се базираат на оптимизација без ограничувања, најчеста методологија за справување со недопустливите решенија, добиени во процесот на пребарување, е примената на пенализациона функција со статички пенализационен фактор. Ваквата постапка бара

избор на адекватна вредност на пенализациониот фактор што може да се добие само со „досадната“ метода „обид-грешка“.

Напредните, односно современите техники за справување со ограничувањата на МА, главно останале непроверени и непроучени при решавање на оптимизациониот проблем SHTWS. Кога ваквите современи техники како на пример *superiority of feasible solutions (SF)*, *stochastic ranking (SR)*, *self-adaptive penalty (SP)* итн., би се интегрирале во МА како на пример GA, односно неговата надоградба NSAGA (којашто е моделирана во оваа докторска дисертација), може да се подобри квалитетот на добиеното решение, притоа со задоволување на сите потребни ограничувања. Ваквите придобивки се особено важни при решавање на SHTWS, чијашто преносна мрежа е моделирана со наизменичниот AC модел, имајќи го предвид двојно поголемиот број управувачки т.е. контролни променливи. Со други зборови, векторот на контролни променливи се состои од активните моќности и напоните на генераторите (неопходни за пресметката на текови на моќност со примена на методот на Newton-Raphson), споредбено со DC моделот каде векторот на контролни променливи е составен само од активните моќности. Освен тоа, при решавање на SHTWS со примена на AC модел, како во оваа докторска дисертација, се јавуваат уште неколку комплексни ограничувања, односно ограничувањата за биланс на активните и реактивните моќности во секој јазол од мрежата, ограничувањето за реактивните моќности на генераторите, како и сигурносното ограничување за напонот на секој јазол од мрежата.

Освен решавање на SHTWS моделирана со AC моделот, во докторската дисертација SHTWS ќе биде решен и со примена на DC моделот, со цел евалуација на перформансите помеѓу двата модела, односно анализа на оправданоста за примена на AC моделот. Покрај статичкиот адаптивен пенализационен фактор SP, во реалниот и бинарниот GA, ќе бидат имплементирани и две нови адаптивни стратегии, односно адаптивна стратегија за вкрстување и адаптивна стратегија за мутација. Од друга страна, операторот вкрстување е моделиран во согласност со функцијата на Лаплас, т.е. Laplace Crossover. Освен тоа, типот на операторот вкрстување за секој хромозом од генерацијата се бира стохастички, односно според добиената вредност на генерираниот рамномерно распределен случаен број (со функцијата *rand*). Во зависност од вредноста на овој број, вкрстувањето за тековната генерација се избира од опциите: Simulated Binary Crossover (SBX), Heuristic Crossover (HX) и Laplace Crossover (LX). Со цел задржување на решенијата т.е. хромозомите што е можно поблиску до допустливиот простор, во SAGA е имплементиран и нов механизам за справување со ограничувањата т.е. *constraint handling repair mechanism*, кој врши корекција на хромозомите во секоја генерација. Целта на овие иновации е задржување на разноликоста на популацијата и конвергенција кон глобален оптимум.

Имајќи предвид дека ветерната енергија има стохастичка, а не детерминистичка природа, се подразбира дека таа се карактеризира со одредена стохастичност. Во оваа докторска дисертација, ваквата стохастичност е моделирана со методот Монте Карло, со кој се генерираат неопходниот број различни симулации т.е. сценарија, кој би дал задоволителна точност. Ваквите симулации се базираат на претходно пресметаните параметри на Weibull-овата функција на распределба на веројатност (коэффициентот на скалирање и коэффициентот на облик), како и на инверзната трансформација на Weibull-овата кумулативна функција на распределба на веројатност, преку која за определен генериран случаен број на Монте Карло симулацијата, се добива случајна вредност за брзината на ветерот, а следствено и излезната моќност на ветерната електрана. По завршувањето на сите сценарија односно симулации, добиените вредности за брзината

на ветер и генерираната моќност графички се претставуваат. Во согласност со добиените аналитички и графички вредности, оптимизациониот проблем SHTWS се решава за сите излезни моќности на ветерната електрана што се јавуваат со одредена веројатност, со цел анализа на сензитивноста на трошоците за гориво, а следствено и на добиените системски параметри.

#### 1.4 МОТИВАЦИЈА ЗА ИСТРАЖУВАЊЕ

Во последните десетина години во научната литература е предложен голем број оптимизациони метахевристички алгоритми (МА) за решавање на проблемите во науката, техниката, економијата, индустријата и операционите истражувања. Примената на егзактните градиентни методи е отежната или невозможна при оптимизација на нелинеарни неглатки и неконвексни функции, со кои често се опишуваат овие проблеми, па во такви случаи е потребна примена на МА. Проблемот кај неглатките функции е тој што не е можно да се определи извод во секоја точка, додека неконвексните функции имаат поголем број локални минимуми кои се разликуваат од глобалниот минимум. Стохастичката природа на МА се состои во тоа што за дадена низа случајно одбрани почетни решенија на некој проблем, алгоритмот дава процена за конечното решение на тој проблем.

Целите на оптимизација се различни: минимизација на загубите и трошоците за енергија, максимизација на ефикасноста, профитот, како и излезните параметри. Во најголем број случаи крајната цел е добивање максимално производство или профит, но со земање предвид на голем број ограничувања. МА настанале со развојот на хевристичките алгоритми. Поимот „хевристика“ може да се толкува како „барање“ или „пронаогање решение по пат на обиди и грешки“ [75]. Тој дава квалитетно решение во разумно време, но не гарантира дека тоа би било оптималното решение. Со други зборови, хевристичкиот алгоритам лесно доаѓа до приближното, но и доволно квалитетно решение. Изразот *мета* подразбира „над“, па генерално може да се каже дека МА се хевристички алгоритми со „повисоко ниво“ на можности за решение на посложени проблеми, кои класичните хевристички алгоритми не можат да ги решат [75]. МА даваат општи упатства како треба да се реши проблемот. При барање на решението, МА вршат случаен избор на решението (рандомизација) и локално пребарување, па според тоа МА можат да се наречат хевристички алгоритми со рандомизација и локално пребарување. Рандомизацијата претставува преоѓање од локално кон глобално пребарување што МА ги прави особено погодни за барање на глобален оптимум или глобален максимум. МА вршат диверзификација т.е. генерирање поголем број различни решенија, со цел да се истражи целиот простор и да се изврши интензификација, т.е. фокусирање на локалниот пребарувачки простор, како би се истражил тој дел од просторот [75], [76], [77]. Истовремено, во текот на пребарувањето, МА вршат селекција на најдобрите решенија. Селекцијата на најдобрите решенија овозможува решенијата постепено да конвергираат кон оптималното решение, при што диверзификацијата спречува решенијата да бидат заробени во локалниот оптимум. Хевристичкиот алгоритам зависи од видот на проблемот, па тој се дизајнира и користи исклучиво за конкретен проблем. Заради поефикасно пребарување на просторот, МА имаат општа природа и можат да се прилагодат за решавање на кој било оптимизационен проблем [76]. МА најчесто се дизајнирани така што ја следат законитоста во природата, па се нарекуваат и алгоритми инспирирани од природата. Алгоритмите инспирирани од природата се дел од вештачката интелигенција и се делат на две главни групи: еволуциски алгоритми и алгоритми на роеви (јата). И двете групи се базираат на популации т.е. групи на единки, па се нарекуваат популациони МА. Секоја едника

претставува еден од кандидатите за оптимално решение во вид на реален број или бит. Функцијата на вредност на решението т.е. фитнес функцијата (*fitness function*) го оценува решението (единката), притоа доделувајќи му некоја вредност врз основа на проценка колку тоа решение е близу до конечното решение. Фитнес функцијата е најчесто еквивалентна на самата критериумска функција. Суштината на сите популациони МА е итеративна корекција на решението, т.е. генерирање нова популација единки (нови решенија) преку примена на стохастички алгоритамски оператори врз единката од тековната популација, што резултира со постепено водење на популацијата кон решенија со поголем квалитет [78]. Клучните перформанси на МА се брзо пребарување на големиот простор од можни решенија, како и способност за пронаоѓање глобално оптимално решение со истовремено избегнување на локалните оптимуми. Начинот на кој се дефинираат алгоритамските оператори, всушност е самиот МА. Ефикасноста и перформансите на МА зависат и од правилното подесување на соодветните алгоритамски параметри. Општата структура на популационите МА, најчесто е прикажана преку следниве чекори:

#### **Чекор 1 (Подготовка)**

- Бирање број на единки  $m \geq 2$  во просторот на кандидатот за решение, параметри на алгоритмот, максимален број на итерации  $t_{max}$  и *fitness* функција  $f(x)$ .
- Подесување на бројачот на итерации на  $t_{max} = 0$ .

#### **Чекор 2 (Иницијализација)**

- Случаен избор на почетна популација единки (кандидати за решение):

$$x_i^{(0)} \in R^n; i = 1, 2, \dots, m$$

- Пресметка на *fitness* функцијата:

$$f^* = \min\{f(x_i^{(0)}), i = 1, \dots, m\}, x^* = \arg f^*$$

$f^*$  - оптимална вредност на *fitness* функцијата

#### **Чекор 3 (ажурирање на управувачката променлива $x_i^{(t)}$ )**

- Генерирање на нова популација единки  $x_i^{(t+1)}$ , со примена на алгоритамските оператори врз секоја единка од тековната популација.
- Пресметка на нова вредност на *fitness* функцијата:

$$f_{\min} = \min\{f(x_i^{(t+1)}), i = 1, \dots, m\}$$

$f_{\min}$  - минимална вредност на *fitness* функцијата од тековната популација

- Ако  $f_{\min} < f^*$ :

$$f^* = f_{\min}$$

$$x^* = \arg f_{\min}$$

#### **Чекор 4 (Запирање на алгоритмот – критериуми)**

- Ако  $t = t_{max}$ , алгоритмот се запира. Во спротивно, за бројачот на итерации се задава  $t = t + 1$  и алгоритмот повторно се враќа на чекор 3.

- На крајот се усвојува решението  $x^*$  како конечно приближно решение на проблемот.

Во оваа докторска дисертација ќе биде применет нов современ GA т.е. NSSAGA, во кој се имплементирани нови механизми и техники за справување со ограничувањата и за решавање на оптимизациониот проблем SHTWS. GA спаѓаат во категоријата на најчесто користени MA [79]. Во последните децении, пристапите базирани на GA привлечиле големо внимание на академската и индустриската заедница, за решавање оптимизациони проблеми за кои се покажало дека се неспоредливи, особено со нивна комбинација со друг MA или класичен оптимизационен алгоритам. GA претставува стохастички пребарувачки алгоритам. Тој го комбинира Дарвиновиот принцип на преживување на најдобрите, со неколку генетски оператори, како би формирал робусен механизам кој е многу ефикасен во пронаоѓањето оптимални решенија. Главните карактеристики на GA, можат да се наведат како:

- супериорна способност за глобално пребарување,
- брза конвергенција во глобалниот оптимум,
- голема флексибилност при многубројното fino подесување, поради повеќето генетски оператори,
- генерира популација од можни решенија во секоја итерација (споредбено со класичните методи што генерираат можно решение по детерминистички пат), при што најдоброто решение „преживува во следната генерација“ т.е. продолжува во следната итерација сè додека не се постигне оптималното решение.

MA даваат оптимално глобално решение кај многу сложените, нелинеарни и неконвексни оптимизациони проблеми, поради нивната независност од диференцијабилноста и континуираноста на целната функција, случајната природа и подобрите истражувачки способности. Подрачјето на примена на MA е широко, односно истите се применуваат во различни подрачја од електроенергетските системи, т.е. економска распределба на оптоварувањето, хидро-термо координација, избор на агрегати, оптимални текови на моќност, оптимално поставување на кондензаторските батерии во дистрибутивните системи, оптимално подесување на релејната заштита итн.

## 1.5 ЦЕЛ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Целите на оваа докторска дисертација се состојат од:

- ❖ Моделирање и решавање на оптимизациониот проблем SHTWS, со сите неопходни ограничувања, со примена на нов бинарно-реален NSSAGA и уважување на стохастичноста на ветерната енергија, со цел анализа на сензитивноста на вкупните трошоци, како и исплатливоста за примена на посложен оптимизационен метод кој секако бара и подолго време на пресметка, а со интегрирање на следниот потпроблем:
- ❖ UC потпроблем со примена на нов бинарен GA, со цел ангажирање само на оние производни единици, кои во текот на оптимизациониот период ќе ги задоволат клучните ограничувања, меѓу кои и ограничувањето за ротирачка резерва.

- ❖ Истражување на перформансите на новите техники за справување со ограничувањата, за решавање на проблемот SHTWS. Ќе се утврди фактот дека досега во научната литература не се доволно истражени ваквите техники, како и нивната примена на конкретниот оптимизационен проблем.
- ❖ Истражување на можноста за примена односно интегрирање на Монте Карло методата во конкретниот оптимизационен проблем, со цел добивање реално и физички прифатливо решение, кое би дало увид во состојбата на системот, во согласност со различните сценарија и нивната веројатност, при негово оперативно планирање.

Имплементација на изготвениот алгоритам во програмскиот пакет MATLAB, како и негово тестирање на стандардни тест системи (со применет DC и AC модел), со цел негова валидација за понатамошна примена.

## 1.6 ОБРАЗЛОЖЕНИЕ НА РАБОТНИТЕ ХИПОТЕЗИ И ТЕЗИ

Истражувањето што ќе се реализира во оваа докторска дисертација, има за цел докажување на следните хипотези:

- ❖ **Главна хипотеза:** Предложениот NSSAGA што се темели на нови техники и механизми за справување со ограничувањата, дава поквалитетно решение споредбено со останатите алгоритми предложени во научната литература, а од друга страна овозможува решавање на конкретниот оптимизационен проблем (кој сè уште не бил предмет на анализа), со уважување на сите неопходни ограничувања.
- ❖ **Помошна хипотеза 1:** Стохастичноста на ветерната енергија, којашто во оваа дисертација е моделирана со Монте Карло методата, има влијание врз вкупните трошоци за гориво на термоелектраните, но и врз параметрите на системот. Ова се должи на фактот дека за обезбедување стабилен погон, при оперативното планирање ротирачката резерва треба да има вредност барем еднаква или поголема на најголемата генерирана моќност од ветерната електрана. Со ова се влијае на оптималната моќност на генераторите, а следствено и врз вкупните трошоци за гориво, односно параметрите на системот т.е. состојбените променливи, имајќи ја предвид промената на тековите на моќност.
- ❖ **Помошна хипотеза 2:** Вкупните трошоци за гориво добиени со примена на AC моделот се разликуваат од добиените со примена на DC моделот, односно тој се карактеризира со физички пореално решение, што претставува оправданост за примена на AC моделот макар и подолгото време на пресметка. Ваквата разлика се должи на фактот дека DC моделот содржи одредени апроксимации при пресметката на тековите на моќност.
- ❖ **Помошна хипотеза 3:** Параметрите на Weibull-овата функција на распределба на веројатност се разликуваат за секоја сезона (пролет, лето, есен и зима) поединечно. Според тоа, при моделирање на стохастичноста на ветерната енергија со методот Монте Карло, најпрво влезните податоци ќе бидат групирани по сезона, а потоа по часови од секој ден во соодветната сезона.



## 1.7 НАУЧЕН ПРИДОНЕС

Во оваа докторска дисертација, а во согласност со прегледот од претходните истражувања, нелинеарниот и неконвексен оптимизационен проблем SHTS, ќе биде моделиран со неконвексна критериумска функција, а со истовремено уважување на следните ограничувања (кои во научната литература не се истовремено уважени):

- АС модел за пресметка на тековите на моќност,
- примена на АС модел за ограничувањето на биланс на активните моќности во секој јазол,
- примена на АС модел за ограничувањето на биланс на реактивните моќности во секој јазол
- генераторско ограничување за минималната и максималната активна моќност на генераторите,
- генераторско ограничување за минималната и максималната реактивна моќност на генераторите
- ограничување за биланс на водниот потенцијал во резервоарот,
- ограничување на протокот низ турбината и ограничување на капацитетот на резервоарот,
- сигурносно ограничување за максимално дозволената промена на оптоварувањето на генераторите за некој краток интервал т.е. ramp rate,
- сигурносно ограничување за обезбедување доволна ротирачка резерва што ќе биде еднаква на најголемата излезна моќност на ветерната електрана, при што ќе биде применет нов модел за нејзино алоцирање помеѓу производните единици, со цел да се спречи „пренатрупување“ во некој јазол од преносната мрежа,
- сигурносно ограничување за напонот на секој јазол од мрежата,
- сигурносно ограничување за максимално дозволения преносен капацитет на преносните водови,
- ограничување за максимално можно производство од некоја хидро или термо единица, во зависност од расположливата количина гориво, односно вода.

Освен тоа, оваа докторска дисертација дава придонес и во:

- уважување на стохастичноста на ветерната енергија, преку формирање нов модел базиран на Монте Карло методата,
- анализа на опсегот на варијацијата на вкупните трошоци за гориво, зависно од сценариото за генерираната моќност од ветерната електрана, на коешто му соодветствува одредена веројатност за појава,
- анализа на стабилноста на параметрите на системот т.е. состојбените променливи од пресметката на тековите на моќност, во зависност од добиените сценарија за генерираната моќност од ветерната електрана,

- нова процедура за етапно уважување на ограничувањата, со цел зголемување на робусноста на алгоритмот, особено кај бинарниот GA во првата фаза, каде што се решава потпроблемот UC,
- нов механизам за корекција на бинарните хромозоми, со цел зголемување на диверзитетот на популацијата на GA што ќе резултира со пронаоѓање на глобалниот оптимум т.е. помали вкупни трошоци,
- нов механизам за корекција на хромозомите кај реалниот GA, за истовремено уважување на сите ограничувања, неопходни за добивање реално и физички прифатливо решение,
- нови современи техники за справување со ограничувањата, особено self-adaptive constraint handling техниката, чијашто примена досега не е истражена кај GA, ниту пак за конкретниот оптимизационен проблем, а чиишто перформанси ќе бидат целосно анализирани и споредени со веќе предложените во научната литература,

Резултатите од споредбата со претходно применетите MA од публикуваната литература, треба да покажат дека алгоритмите се однесуваат различно за различни случаи на проблемот SHTWS, т.е. дека еден алгоритам со соодветна техника за справување со ограничувањата, не може да биде најдобар за секоја критериумска функција на проблемот, дури за ист оптимизационен проблем со различни ограничувања. Ова е во согласност со теоремата „Нема бесплатен ручек“ („*No free lunch*“) [80], што се однесува на оптимизационите алгоритми и од која може да се заклучи дека: (1) не е можно да се пронајде еден алгоритам за оптимизација што ќе биде најдобар за сите проблеми и (2) како би се моделирал еден алгоритам со соодветните карактеристики, потребно е да се познава проблемот што тој го решава. За таа цел, алгоритмот што ќе го решава оптимизациониот проблем SHTWS, моделиран со AC моделот, ќе биде пософистициран, споредбено со алгоритмот за решавање на SHTWS, со примена на DC моделот.

## 1.8 СТРУКТУРА НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА

Докторската дисертација е составена од 11 поглавја што хронолошки ја истакнуваат методологијата на истражување, притоа почнувајќи од основите на енергетско-експлоатационите карактеристики на електричните центри, преку методот Монте Карло и методот на Newton-Raphson за решавање на тековите на моќност, па сè до математичкото моделирање на оптимизациониот проблем и приказ на применетите техники за негово решавање.

Во првото поглавје, односно воведот е извршен сеопфатен преглед на научните достигнувања на релевантна научна литература во областа на оптимизациониот проблем SHTS и SHTWS, објавени во референтни научни списанија и конференции. Научните достигнувања се класифицирани во согласност со применетиот оптимизационен метод, со придружна кратка дискусија за секое научно достигнување. Истакнат е и преглед како на бројот на објавени трудови во согласност со применетиот оптимизационен метод, така и бројот на објавени трудови за конкретниот оптимизационен проблем. Направена е и соодветна дискусија за претходните научни достигнувања, а следствено се прикажани и научните достигнувања на кандидатот поврзани со докторската дисертација.

Во второто поглавје се прикажани енергетско-експлоатационите карактеристики на електричните центри. Притоа е извршено математичко моделирање на енергетско – експлоатационите карактеристики, на сите производни капацитети, вклучувајќи ја и енергетската карактеристика на ветерната електрана, неопходни при согледување и решавање на оптимизациониот проблем SHTWS. Освен тоа, анализирани се и статистичките показатели за ресурсите на ветерната енергија, како што се: средна брзина и густина на ветрот, ружа на ветрови, дискретен хистограм на брзината на ветрот, како и најважниот показател за оваа дисертација т.е. Weibull-овата функција на распределба на веројатност, односно инверзната трансформација на Weibull-овата кумулативна функција на распределба на веројатност.

Во третото поглавје е прикажана Монте Карло методата со која во оваа докторска дисертација се моделира стохастичноста на ветерната енергија. Најпрво е даден краток вовед, а потоа се прикажани дефиницијата на методата, начините на генерирање на случајните броеви, како и параметрите потребни за анализа на квалитетот на добиените резултати.

Во четвртото поглавје е прикажан методот на Newton-Raphson, со кој се пресметуваат напоните, односно тековите на моќност во AC моделот на оптимизациониот проблем SHTWS. Накратко ќе биде прикажана постапката за формирање на матрицата Јакобијан, неопходна за решавање на системот нелинеарни равенки, т.е. пресметка на напоните во ЕЕС.

Во петтото поглавје е дефиниран поимот оптимизација како научна дисциплина. Дадена е класификацијата на оптимизационите проблеми, а секоја класа е поединечно опишана и дефинирана. Посебно внимание е посветено на класата сложени оптимизациони проблеми, каков што е SHTWS. Што се однесува до оптимизационите алгоритми, изложен е и анализиран преглед на нивната класификација, а се дефинирани и термините хевристика и метахевристика.

Во шестото поглавје е прикажан GA како метахевристички алгоритам, заедно со основните параметри т.е. критериумска функција, популација, селекција, вкрстување, мутација и елитизам. Прикажани и имплементирани се две нови стратегии за вкрстување и мутација, со цел спречување прерана конвергенција. Прикажани и моделирани се и двата нови механизми за корекција на хромозомие т.е. repair mechanisms, од кои едниот е имплементиран во бинарниот GA (чијашто намена е UC т.е. прва фаза од новопредложената методологија на истражување), а другиот во реалниот GA (за решавање на SHTWS т.е. втора фаза од новопредложената методологија на истражување). Освен тоа, прикажани се и математичките модели на новопредложените техники за справување со ограничувањата, т.е. superiority of feasible solutions (SF), stochastic ranking (SR) и self-adaptive penalty (SP). Следствено прикажани се и нивните бенефити, како и можноста за нивна примена во конкретниот оптимизационен проблем.

Во седмото поглавје е прикажана оптимизација на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори со примена на SAGA. Имајќи предвид дека алгоритмот во оваа докторска дисертација врши оптимизација на погонот на ЕЕС, тој ќе биде поделен во три фази, т.е. моделирање на стохастичноста на ветерната енергија, UC и SHTWS. На самиот почеток, односно во фаза 1, како влезен параметар, е моделирана стохастичноста на генерираната моќност од ветерната електрана, со методот Монте Карло, односно направен е аналитички и графички увид во добиените резултати. Според добиените резултати од Монте Карло симулацијата, извршен е избор на сценаријата според кои ќе се решава SHTWS. Потоа е прикажана фаза 2 во којашто се решава оптимизациониот проблем UC. Тој е формулиран заедно со сите ограничувања, а е прикажана

методологијата за негово решавање. Потоа е прикажана третата фаза од алгоритмот, односно формулиран е оптимизациониот проблем SHTWS со сите неопходни ограничувања. Освен тоа, методолошки по принципот „чекор по чекор“, прикажана е и имплементацијата на новопредложениот SAGA во програмскиот пакет MATLAB, заедно со целокупниот блок дијаграм на алгоритмот, кој е биде применет за решавање на SHTWS.

Во осмото поглавје најпрво се прикажани резултатите од моделирањето на стохастичноста на ветерната енергија, односно резултатите од пресметката на параметрите на Weibull-овата функција на густина на веројатност за секоја сезона со методот на Newton. Потоа се прикажани резултатите од симулациите со методата Монте Карло и е даден приказ на добиените хистограми со распределба на веројатноста на брзините на ветер за соодветната сезона, како и соодветна анализа на ваквите резултати. Понатаму, новопредложениот NSAGA е применет на четири тест системи од литературата, со цел верификација на неговата точност и ефикасност. Покрај ова, предложениот NSAGA, како со AC, така и со DC моделот, најпрво е применет на IEEE тест систем за решавање на оптимизациониот проблем SHTS, со цел анализа и споредба на резултатите добиени со примена на DC и AC моделот, како и оправданоста за примена на AC моделот.

Во деветтото поглавје новопредложениот NSAGA е применет на модифициран IEEE 30 bus тест систем, за решавање на оптимизациониот проблем SHTWS, со цел увид во влијанието на стохастичноста на ветерната енергија врз трошоците за гориво на термоелектраните, како и врз системските параметри, во согласност со различните сценарија на кои им соодветствува одредена веројатност за појава. Како основно сценарио е земено сценариото во кое е пресметана средната вредност на брзината на ветрот, односно средната вредност на излезната моќност на ветерната електрана, за секој интервал.

Во десеттото поглавје е извршена анализа на добиените резултати. Најпрво, е извршена компаративна анализа на добиените резултати од четирите тест системи, со резултатите од другите метахевристички алгоритми. Потоа е извршена и компаративна анализа на добиените резултати од DC и AC моделот, при решавањето на оптимизациониот проблем SHTS. На крајот, посебен осврт е даден на анализата на добиените резултати од случајот за анализа, во поглед на сензитивноста на трошоците за гориво од стохастичноста на ветерната енергија. Оваа анализа ја опфаќа и анализата на добиените резултати за параметрите на системот, т.е. состојбените променливи од пресметката на текови на моќност за оптималното решение. Ваквиот увид ја докажува тезата дека стохастичноста на ветерната енергија т.е. различната оптимална моќност на генераторите во различните сценарија, влијае врз параметрите на системот и неговата стабилност.

Во единаесеттото поглавје е даден релевантен заклучок од извршените истражувања во оваа докторска дисертација, како и насоките за идни истражувања, но и можноста за практична примена на новопредложениот NSAGA.

# **ЕНЕРГЕТСКО- ЕКСПЛОАТАЦИОНИ КАРАКТЕРИСТИКИ И МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ НА ПРОИЗВОДНИТЕ КАПАЦИТЕТИ**

---

---

**Поглавје**

**2**

## 2 ЕНЕРГЕТСКО-ЕКСПЛОАТАЦИОНИ КАРАКТЕРИСТИКИ И МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ НА ПРОИЗВОДНИТЕ КАПАЦИТЕТИ

За да бидат задоволени потребите на потрошувачите, електраните мораат да бидат во можност да ја произведат потребната енергија со потребната моќност во соодветниот временски интервал. Освен тоа, електраните мора да обезбедат и неопходна резерва за покривање на ненадејните промени на оптоварувањето (регулациска резерва), генераторските единици што се во ремонт (ремонтна резерва), како и за непланирани испади на производните капацитети (ладна резерва).

Основна карактеристика на секоја електрана е нејзината **инсталирана моќност**, којашто е дефинирана како збир од назначените привидни моќности на генераторите (MVA), односно номиналните моќности на примарните погонски турбини (MW). Инсталираната моќност е истовремено номинална моќност на електраната.

За енергетски анализи треба да се познава **максималната моќност** на електраната, што таа како целина може да ја генерира, под претпоставка дека сите делови на електраната се способни за погон. За хидроцентралата дополнително се претпоставува дека протокот и нето падот се оптимални, а за термоцентралата дека на располагање стои доволна количина гориво со одреден квалитет, како и доволна количина вода со нормална температура и чистота за ладење на кондензаторот. При одредувањето максимална моќност, не се поставува барање за постигнување одреден степен на корисно дејство.

**Расположливата моќност** на електраната е најголемата моќност што таа може да ја произведе во одреден момент, поаѓајќи од реалната состојба во електраната, со претпоставка дека нема ограничувања поради производството на реактивна моќност. При одредување на расположливата моќност, кај хидроцентралата се зема предвид расположливиот доток и пад, додека кај термоцентралата - квалитетот на горивото, количината и температурата на водата.

Карактеристична величина на хидроцентралата е можното годишно производство (GWh), кое претставува максимално производство што би можело да се оствари со користење на најголемата расположлива количина на вода под најповолни услови [81, 82, 83].

### 2.1 ХИДРОЕЛЕКТРАНИ

Енергетско-економската улога на хидроелектраната во ЕЕС може да се согледа низ енергетските перформанси на разгледуваната електрана, нејзиното учество во вкупното производство во системот, хидролошките услови под кои ќе се врши нејзина експлоатација, влијанието на останатите електрани во системот итн.

#### 2.1.1 Основни карактеристики на хидроелектраната

Основните карактеристики на хидроцентралата може да се поделат на:

- Хидролошки карактеристики на водотекот,
- Карактеристики на акумулацијата и падот,
- Енергетски карактеристики.

Хидролошките карактеристики на хидроцентралата се: величината, распоредот и траењето на дотокот. Можноста за производство на хидроцентралата зависи од количината на вода што ја донесува речниот тек. Познавањето на таа количина од аспект на величина и временски распоред е од основна важност за планирање на погонот на хидроцентралата.

Карактеристиките на акумулацијата и падот се волуменот и енергетската вредност на акумулацискиот базен, како и нето падот.

Геометрискиот или вкупниот волумен претставува количина на вода што може да се смести помеѓу дното и највисокото ниво на вода во акумулацискиот базен. Корисниот волумен одговара на искористливата количина на таа вода, т.е. помеѓу највисокото и најниското работно ниво на акумулацијата, додека мртвиот простор е неискористлив дел од вкупниот волумен на акумулацијата.

**Енергетска вредност** е количина на електрична енергија што би се произвела во хидроцентралата и во сите низводни хидроцентрали (доколку станува збор за каскадно врзани хидроцентрали), кога би се испразнил корисниот волумен, притоа без доток на вода во акумулацијата и без загуби на вода.

Во хидроцентралата се разликуваат природен (брuto) пад и корисен (нето) пад. Природниот бруто пад е разлика помеѓу нивото на вода во зафатот (ниво на горна вода) и нивото на водата по враќање во речното корито или на крајот од одводот (ниво на долна вода). Корисниот нето пад е помал од природниот бруто пад, поради загубите во зафатот, доводот, притисниот цевковод и одводот на влезот во турбината. Промената на падот има големо влијание врз моќноста и можното производство доколку станува збор за хидроцентрали со мал пад (до 50 m), додека кај хидроцентралите со голем пад, таа промена често може да се занемари [81 - 84].

Моќноста на хидроагрегатот се пресметува според изразот:

$$P_{gh} = 9,81 \rho_h Q_t H_n \eta_t \eta_g \cdot 10^{-6} \text{ [MW]} \quad (2.1)$$

каде што

$\rho_h = 1000$  - густина на водата  $[\text{kg} / \text{m}^3]$

$Q_t$  - проток на вода низ турбината  $[\text{m}^3/\text{s}]$

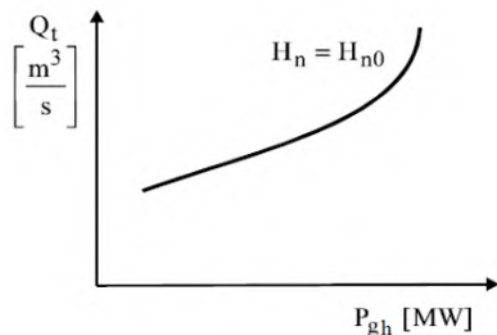
$H_n$  - нето пад  $[\text{m}]$

$\eta_t \eta_g$  - степени на корисно дејство на хидрауличната турбина и генераторот

Со оглед на тоа дека сопствената потрошувачка на хидроцентралите е релативно мала, може да се претпостави дека моќноста на прагот на електраната т.е. излезната моќност е еднаква со моќноста на генераторот.

Основната енергетска карактеристика на хидроагрегатот (влезно-излезна карактеристика) е прикажана на сликата 2.1, а таа ја дава зависноста на протокот на вода низ турбината од моќноста, за одреден нето пад  $H_n = H_{n0}$ :

$$Q_t = f(P_{gh}) \quad (2.2)$$



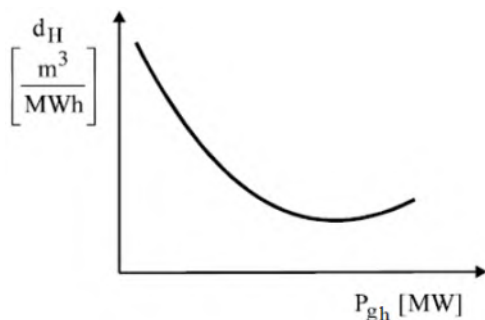
Слика 2.1 Основна енергетска карактеристика на хидроагрегат за одреден константен нето пад

Од основната карактеристика на хидроагрегатот, се изведува карактеристиката на специфичната потрошувачка на вода, прикажана на сликата 2.2, а е дефинирана со изразот:

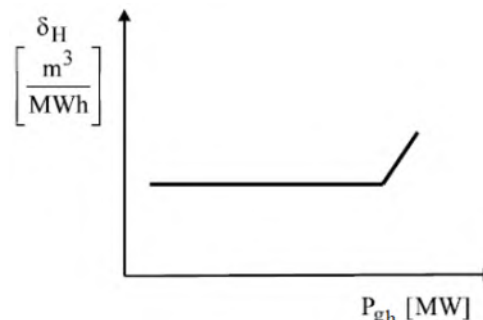
$$d_H = \frac{3600Q_t(P_g)}{P_{gh}} = \frac{Q_t^h}{P_{gh}} = d_H(P_E) \quad [\text{m}^3 / \text{MWh}] \quad (2.3)$$

каде

$Q_t^h$  - часовен проток низ турбината  $[\text{m}^3/\text{h}]$



Слика 2.2 Карактеристика на специфична потрошувачка на вода на хидроагрегат



Слика 2.3 Карактеристика на диференцијалниот прираст на потрошувачка на вода на хидроагрегат

Карактеристиката на диференцијалниот прираст на потрошувачката на вода е прикажана на сликата 2.3, а таа се пресметува како:

$$\delta_H = \frac{3600dQ_t(P_{gh})}{dP_{gh}} = \frac{dQ_t^h}{dP_{gh}} = \delta_H(P_{gh}) \quad [\text{m}^3 / \text{MWh}] \quad (2.4)$$

### 2.1.2 Прилагодување на хидроелектраната на дијаграмот на оптоварување

Од аспект на големината на акумулацискиот базен, хидроцентралите можат да бидат проточни, акумулациони со дневна и месечна акумулација или акумулациони со сезонска акумулација.

Времето на празнење на акумулацијата  $T_{pr}$ , е време потребно да се испразни корисната акумулација со инсталираниот проток, преку претпоставка дека во тој период



нема доток на вода, ниту пак загуби поради прелив. Времето на празнење на акумулацијата се пресметува според изразот:

$$T_{pr} = \frac{V_k}{3600Q_t} [h] \quad (2.5)$$

каде што

$V_k$  - корисен волумен на акумулацијата [ $m^3$ ]

$Q_t$  - проток на вода низ турбината [ $m^3/h$ ]

Врз основа на времето на празнење на акумулацијата, е усвоена следната класификација:

$0 \leq T_{pr} \leq 2h$  - проточна хидроцентрала,

$2h \leq T_{pr} \leq 400h$  - хидроцентрала со дневна и седмична акумулација,

$T_{pr} \geq 400h$  - хидроцентрала со сезонска (или повеќегодишна) акумулација.

Во проточната и акумулационата хидроцентрали нема технички ограничувања, ниту пак проблем околу запирањето и повторното ставање во погон.

За оцена на можноста за задоволување на конзумот, меродавна е расположливата моќност, одредена со дотокот на вода што може да се искористи во турбините. Во услови на задоволување на потребите на потрошувачката во ЕЕС, технички е можно проточните хидроцентрали со краткотрајно регулирање да се приспособат на потребите на системот, како би дале поголема моќност од расположливата моќност на водотекот. Меѓутоа, поради релативно малиот волумен во зоната на горна вода, таквите можности се ограничени. Поради тоа, за проточните хидроцентрали може да се каже дека нивната расположлива моќност е еднаква на моменталната моќност на водотекот. Затоа тие имаат значајна улога во ЕЕС само во влажниот (дождливиот) дел од годината, додека во сушниот дел се вршат нивни ремонти. Со оглед на положбата и ограничените можности за производство на проточните хидроцентрали во системот, произлегува услов дека тие треба да се сместат во најнискиот дел од дијаграмот на оптоварување, т.е. за покривање на базното оптоварување.

За разлика од проточните хидроцентрали, коишто можат да произведат моќност што одговара на протокот и падот во дадениот момент, акумулационата хидроцентрали може секогаш да произведе максимална моќност што одговара на нето падот во дадениот момент, но без оглед на дотокот во акумулацијата. Тоа е максималната моќност што акумулационата хидроцентрали може да ја даде, а е ограничена со нејзината инсталирана моќност.

Акумулационите хидроцентрали се многу важни за ЕЕС од следните причини:

- Поради високите маневарски способности многу се погодни да работат како ротирачка резерва на системот (оваа резерва ја сочинуваат сите агрегати што се синхронизирани на мрежа, но се делумно оптоварени, па се во состојба на себе да примаат оптоварување за многу кратко време). Во тој случај, подигањето на оптоварувањето и достигнувањето на најголема расположлива моќност, е еднакво на брзината на делување на регулаторот на турбината и изнесува само неколку секунди,

- Поради можноста за многу брзо влегување во погон (стартот и синхронизацијата на мрежа од состојба на мирување изнесува само неколку десетина секунди), многу се погодни да ја преземат улогата на ладна резерва во системот,
- Многу флексибилно се прилагодуваат на оптоварувањето, па се најпогодни за покривање на варијабилните и врвните оптоварувања.

Реверзибилните хидроцентрали се електрани со големи маневарски способности. Меѓутоа, нивната енергија е многу скапа поради енергијата потрошена за пумпање. Поради тоа, тие се користат со нивното краткотрајно ангажирање да се покријат самите врвови од дијаграмот на оптоварување, па потоа преоѓаат во состојба на чекање како многу важна ладна резерва (оваа резерва ја сочинуваат агрегатите на електраните што се наоѓаат во полна погонска спремност, но се надвор од погон).

Можното производство на варијабилната и константната енергија е исклучително важен показател за вреднување на хидроцентралите во ЕЕС. Врз основа на овие показатели се согледува реалната улога на хидроцентралите во системот, притоа овозможувајќи нивна реална и економска валоризација. Поради тоа, за секоја хидроцентрала којашто е предмет на анализа, се дефинираат величини во врска со можното производство на електрична енергија: вкупно производство, производство на варијабилна енергија и производство на константна енергија. Врз енергетско-економската валоризација на хидроцентралата, сè поголемо влијание зазема аспектот на произведена енергија, изразен како удел на варијабилната енергија во однос на вкупното производство [81 -84].

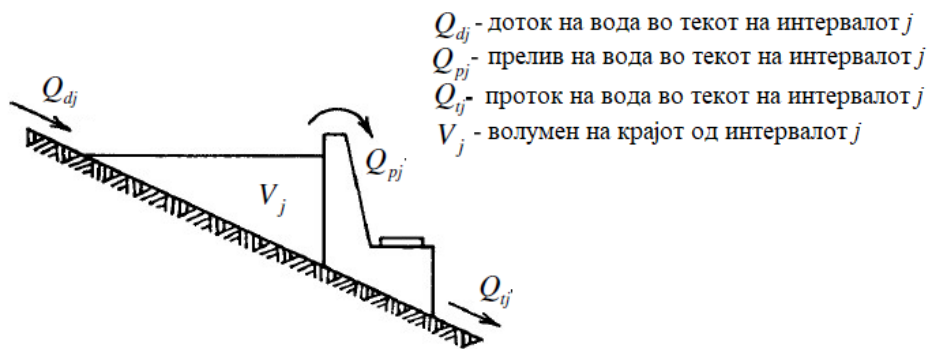
### 2.1.3 Модел на хидроелектрана

Врз можното производство на хидроелектраната, освен погонските ограничувања влијаат и хидролошките услови во системот, односно количината на вода што е на располагање. Акумулационите хидроелектрани се моделираат врз основа на водниот потенцијал, волуменските ограничувања на акумулацијата, протокот на вода низ турбината и можниот опсег на работа на агрегатите. Во случај на каскадно врзани хидроелектрани, моделот дополнително се проширува поради влијанието на акумулациите во узводните хидроелектрани, врз билансот на водниот потенцијал во низводните хидроелектрани.

#### 2.1.3.1 Биланс на водниот потенцијал

Моделот на акумулацијата (базенот) што се користи во експлоатацијата, претставува релација помеѓу корисниот волумен на вода  $V_k$ , природниот доток  $Q_d$ , протокот на вода низ турбината  $Q_t$  и преливот  $Q_p$ . Ваквиот модел претставува биланс на водниот потенцијал, односно промена на состојбата на базенот во сите последователни интервали, во текот на оптимизациониот период [82 – 84].

Корисниот волумен на акумулацијата на крајот од интервалот  $j$ , кој е воедно и почетна состојба за интервалот  $j + 1$ , е еднаков на волуменот на почетокот на интервалот, намален за количината на вода пропуштена низ турбината и преливот, а зголемен за количината на вода во базенот од природниот доток, како што е прикажано на сликата 2.4[82 – 84].



Слика 2.4 Модел на акумулациона хидроелектрана

Земајќи ја предвид сликата 2.4, математичкиот модел за билансот на водниот потенцијал за една акумулациона хидроелектрана е даден со следниот израз:

$$V_{h,j} = V_{h,j-1} + T_j (Q_{d,h,j} - Q_{t,h,j} - Q_{p,h,j}) \quad (2.6)$$

каде што

$h$  – индекс на хидроелектраната, односно нејзината акумулација

$j$  – индекс на временскиот интервал

$T_j$  - должина (времетраење) на временскиот интервал  $j$

$V_{h,j}$  - волумен на вода во акумулацијата  $h$  во временскиот интервал  $j$

$Q_{d,h,j}$  - природен доток на вода во акумулацијата  $h$  во временскиот интервал  $j$

$Q_{t,h,j}$  - проток низ турбината на електраната  $h$  во временскиот интервал  $j$

$Q_{p,h,j}$  - прелив од акумулацијата  $h$  во временскиот интервал  $j$

Во случај на две или повеќе каскадно врзани хидроелектрани, математичкиот модел додатно се проширува, земајќи го предвид влијанието на испуштената вода од узводните акумулации, врз билансот на водниот потенцијал во низводните акумулации. Според тоа, ваквиот математички модел може да се претстави со изразот [82-84]:

$$V_{h,j} = V_{h,j-1} + T_j (Q_{d,h,j} - Q_{t,h,j} - Q_{p,h,j}) + T_j \sum_{u=1}^{UAK} (Q_{t,u,j} + Q_{p,u,j}) \quad (2.7)$$

каде што

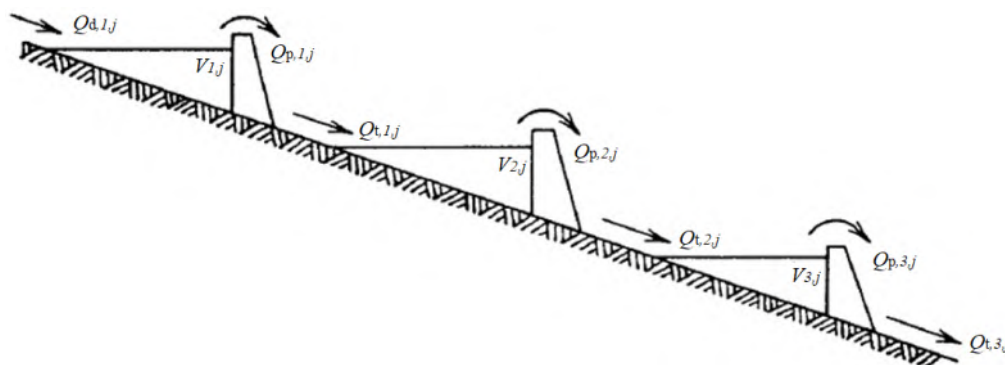
$UAK$  - вкупен број акумулации узводно од  $n$  – тата акумулација

$Q_{t,u,j}$  - проток низ турбината на електраната  $u$  во временскиот интервал  $j$

$Q_{p,u,j}$  - прелив од узводната акумулација  $u$  во временскиот интервал  $j$

На сликата 2.5 е прикажан систем од три каскадно врзани хидроелектрани со соодветни акумулации на ист речен тек, како и влијанието на испуштената вода (од турбината и преливот) од узводните акумулации врз билансот на водата на низводната акумулација. Според сликата 2.5, доколку се разгледуваат акумулациите 1 и 2, акумулацијата 1 претставува узводна, а акумулацијата 2 низводна акумулација. Слично како претходниот случај, доколку се разгледуваат акумулациите 2 и 3, тогаш

акумулацијата 2 претставува узводна, а акумулацијата 3 низводна акумулација. Но, во случај да се анализираат сите прикажани акумулации, а имајќи ги предвид претходно наведените два случаи, тогаш акумулациите 1 и 2 претставуваат узводни акумулации (за акумулацијата 3), а акумулацијата 3 се третира како низводна акумулација.



Слика 2.5 Модел на три каскадно врзани хидроелектрани

### 2.1.4 Основни технички ограничувања на хидроелектраните

Основните ограничувања што треба да се земаат предвид во процесот на експлоатација на хидроелектраната, се однесуваат на погонските карактеристики на хидроагрегатот и карактеристиките на акумулациониот базен.

Погонските ограничувања на хидроелектраната што мора да бидат уважени во текот на целиот оптимизационен период се: генераторското ограничување, ограничувањето за проток низ турбината, како и ограничувањето за волуменот на акумулациониот базен, односно:

$$P_{GH,h}^{\min} \leq P_{GH,h,j} \leq P_{GH,h}^{\max} \quad (2.8)$$

каде што

$P_{GH,h}^{\min}$ ,  $P_{GH,h}^{\max}$  - минимална, односно максимална моќност на генераторот  $h$  [MW]

$P_{GH,h,j}$  - моќност на генераторот  $h$  во временскиот интервал  $j$  [MW]

$$Q_{t,h}^{\min} \leq Q_{t,h,j} \leq Q_{t,h}^{\max} \quad (2.9)$$

каде што

$Q_{t,h}^{\min}$ ,  $Q_{t,h}^{\max}$  - минимален, односно максимален проток на вода низ турбината на хидроелектраната  $h$  [m<sup>3</sup>/h]

$Q_{t,h,j}$  - проток на вода низ турбината  $h$  во временскиот интервал  $j$  [m<sup>3</sup>/h].

Ограничувањето што се однесува на волуменот на вода во акумулацијата, е дефинирано со релацијата:

$$V_h^{\min} \leq V_{h,j} \leq V_h^{\max} \quad (2.10)$$

каде што

$V_h^{\min}$ ,  $V_h^{\max}$  - минимален односно максимален волумен на вода на акумулацијата  $h$  [m<sup>3</sup>/h]

$V_{h,j}$  - волумен на вода на акумулацијата  $h$  во временскиот интервал  $j$  [m<sup>3</sup>/h].

Ограничувањето што се однесува на акумулацискиот базен, а е од нелинеарен карактер, е всушност ограничувањето за расположлива количина на вода, во текот на оптимизациониот период, т.е.:

$$\sum_{j=1}^J Q_{t,h,j} \cdot T_j = V_h \quad (2.11)$$

односно

$$\sum_{j=1}^J Q_{t,h,j} \cdot T_j - V_h = 0 \quad (2.12)$$

Зависноста на протокот на вода низ турбината од моќноста на генераторот, за одреден нето пад  $H_n = H_{n0}$ , ја претставува основната енергетска карактеристика (влезно – излезна карактеристика) на хидроелектраната и таа се прикажува како квадратна зависност, односно:

$$Q_{t,h}(P_{GH,h}) = \alpha_h + \beta_h \cdot P_{GH,h} + \gamma_h \cdot P_{GH,h}^2 \quad (2.13)$$

каде за  $h = 1, \dots, NH$

$Q_{t,h}(P_{GH,h})$  - функција на протокот на вода низ турбината во зависност од моќноста на генераторот  $h[m^3/h]$

$\alpha_h, \beta_h, \gamma_h$  - константи на генераторот за одреден нето пад

$P_{GH,h}$  - моќност на генераторот  $h[MW]$

Во случај на краткорочна хидро – термо координација, т.е. оптимизација на ниво од еден ден, којашто е предмет на анализа на оваа докторска дисертација, потполно е оправдано да се претпостави дека нето падот е константен во текот на оптимизациониот период.

Преостанатите технички ограничувања што ќе бидат уважени во оптимизациониот проблем на оваа докторска дисертација, ќе бидат прикажани и математички моделирани во наредните поглавја, во целина со формулацијата на оптимизациониот проблем.

## 2.2 ТЕРМОЕЛЕКТРАНИ

Термоелектраните се постројки во коишто топлината добиена од согорување на горивото, се претвора во механичка енергија со посредство на медиум за пренос на топлината и погонските мотори, а потоа во механичката енергија се претвора во електрична енергија со посредство на електричен генератор. Според типот на погонскиот мотор, термоелектраните се делат на [81-84]:

- Термоелектрани на пареа,
- Гаснотурбински термоелектрани,
- Термоелектрани чишто генератори се задвижувани од мотори со внатрешно согорување.

Во оваа докторска дисертација предмет на разгледување се термоелектраните на пареа што користат фосилни горива.

## 2.2.1 Трошоци за работа во термоелектраните

За разлика од хидроелектраните, чиешто ставање во погон е брзо и притоа со ниски трошоци за стартување, за термоелектраните е потребен релативно долг период за подготовка на погонот (за синхронизација на агрегатите) и трае од 4 до 8 часа со релативно високи трошоци за ставање во погон. Поради тоа, при ангажирањето на термоелектраните во сложен ЕЕС, неопходна е анализа на економските карактеристики на термоелектраната, како појдовна точка за начинот на нивно ангажирање [81 - 84].

Во термоелектраните се разликуваат следните категории трошоци:

- Трошоци за ставање во погон или одржување на агрегатот во топла состојба,
- Трошоци за производство (погонски трошоци),
- Трошоци за запирање на агрегатот.

Кога некоја термоелектрана се става во погон, трошоците што ги бара ваквата операција зависат од состојбата на оладеност на котелот и турбината, односно од времето што изминало од последното исклучување на термоелектраната од погон. Ако по исклучувањето на агрегатот од погон се дозволи агрегатот да се олади, тогаш трошоците за повторно ставање во погон и синхронизација на термоелектраната на мрежа, можат да се апроксимираат со експоненцијална крива во функција од времето на ладење, како што е прикажано на сликата 2.6, чијшто облик е даден со изразот:

$$C_{SC,t} = C_{K0,t} \cdot (1 - e^{-\nu_t \cdot \tau}) + C_{T0,t} \quad (2.14)$$

$C_{SC,t}$  - трошоци за повторно ставање на термоелектраната  $t$  во погон при ладна состојба [€]

$C_{K0,t}$  - трошоци потребни за стартување на котелот  $t$  од ладна состојба [€]

$C_{T0,t}$  - трошоци потребни за стартување на турбината  $t$  од ладна состојба [€]

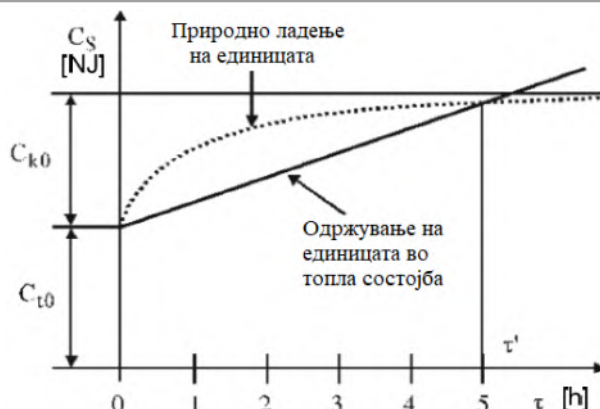
$\nu_t$  - константа на ладење на котелот  $t$  [ $\text{h}^{-1}$ ]

$\tau_t$  - време на пауза, односно времетраење за кое термоелектраната  $t$  е надвор од погон [h]

По времетраење од 15 часа се смета дека агрегатот е потполно оладен. Кога агрегатот се десинхронизира од мрежа, тој може да се одржува во топла состојба, бидејќи тоа би можело да биде поевтина опција за разлика од онаа кога би се оставил да се олади. Трошоците за ставање на агрегатот во погон, кога се одржува во топла состојба, се во линеарна зависност од односот на времетраењето на паузата, како што е прикажано на сликата 2.6, а се дефинираат според изразот:

$$C_{SH,t} = C_{T0,t} + C_{B\tau,t} \quad (2.15)$$

каде  $C_{B\tau}$  се неопходни трошоци за одржување на термоелектраната  $t$  во топла состојба.



Слика 2.6 Зависност на трошоците за ставање во погон на термо блоковите што претходно биле природно оладени или одржувани во топла состојба

Од сликата 2.6 може да се увиди дека до некое време, поекономична е втората варијанта споредбено со првата.

Погонските трошоци во термоелектраната се состојат од трошоци за гориво, како и трошоци за погон и одржување. Трошоците за гориво по величина се најзначајна категорија трошоци, од аспект на оптимална распределба на оптоварувањето помеѓу генераторите, чијашто критериумска функција е токму минимизација на трошоците за гориво. Трошоците за погон и одржување што се јавуваат во секојдневната експлоатација, се трошоци предизвикани од планирани и непланирани ремонти, како и останати активности поврзани со експлоатацијата.

Трошоците за запирање т.е. исклучување од погон се однесуваат на трошоците за загуба на топлина, поради постепено или нагло намалување на оптоварувањето при запирање на турбоагрегатот.

## 2.2.2 Основни карактеристики на термоелектраната

Производството на термоелектраните во прв ред зависи од можноста за пласман на енергија, па потоа во втор ред од техничките можности.

Можното производство на термоелектраната во некој временски период, со претпоставка дека на располагање стои доволна количина гориво, е пропорционално со нејзината максимална моќност. Тоа се смета како производ од расположливата моќност на термоелектраната во периодот кој се разгледува и должината на предвидената работа, земајќи ги предвид планските и принудните запирања.

**Техничкиот минимум** на термоелектраната е онаа минимална моќност при којашто термоелектраната може да работи со основното гориво, како и со одржување на стабилноста на процесот на добивање топлина од примарниот извор на енергија.

**Дозволената брзина на промена на оптоварувањето** т.е. ramp rate limit е одредена со термичките напрегања на материјалот, а зависи и од конструкцијата и карактеристиките на турбината.

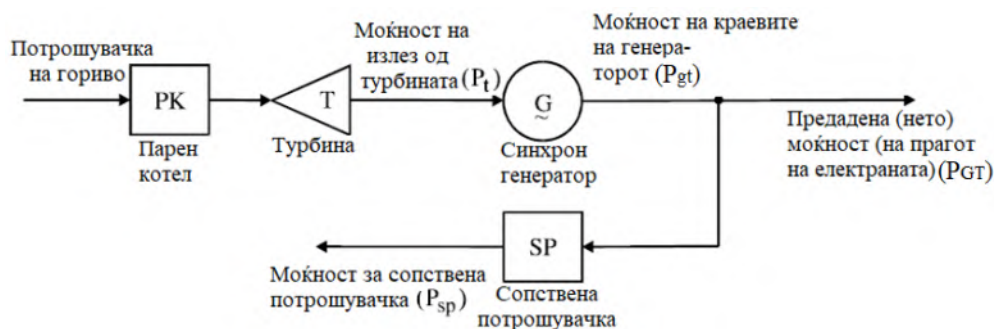
За пресметка на погонските трошоци на термоелектраната  $t$ , најважни се енергетските влезно – излезни карактеристики на производните единици. Влезните параметри кои се показатели за применетото гориво се [81-84]:

- Часовна потрошувачка на топлина  $D_t$  [MJ/h]

- Часовна потрошувачка на гориво  $H_t$  [kg/h]
- Часовни трошоци за гориво  $F_t$  [€/h]

Излезниот параметар е предадената генераторска моќност. Овие карактеристики се даваат за бруто влез и нето излез, односно се пресметува излезната моќност т.е. моќноста на прагот на електраната.

На сликата 2.7 е даден приказ на блок шема на термо блок за добивање на основните енергетски карактеристики.



Слика 2.7 Блок шема на термо блок за одредување на основните енергетски карактеристики

Врз основа на карактеристиката на часовна потрошувачка на топлина во функција од моќноста  $D_t(P_{GT,t})$ , се дефинира карактеристика на часовна потрошувачка на гориво во функција од моќноста  $H_t(P_{GT,t})$  и карактеристика на часовни трошоци за гориво во функција од моќноста  $F_t(P_{GT,t})$ , кои меѓусебно се дефинирани со релациите:

$$H_t(P_{GT,t}) = \frac{D_t(P_{GT,t})}{k_{top}} \quad (2.16)$$

$$F_t(P_{GT,t}) = H_t(P_{GT,t}) f_{top} = D_t(P_{GT,t}) \frac{f_{gor}}{k_{top}} \quad (2.17)$$

каде што

$P_{GT,t}$  - моќност на (прагот) на термоелектраната  $t$  [MW]

$H_t(P_{GT,t})$  - часовна потрошувачка на гориво [kg/h]

$F_t(P_{GT,t})$  - часовни трошоци за гориво [€/h]

$k_{top}$  - топлинска вредност на горивото [MJ/kg]

$f_{gor}$  - специфична цена на горивото по единица мерка [€/kg]

$f_{top} = \frac{f_{gor}}{k_{top}}$  - фактор на конверзија на часовната потрошувачка на топлина во часовни трошоци за гориво



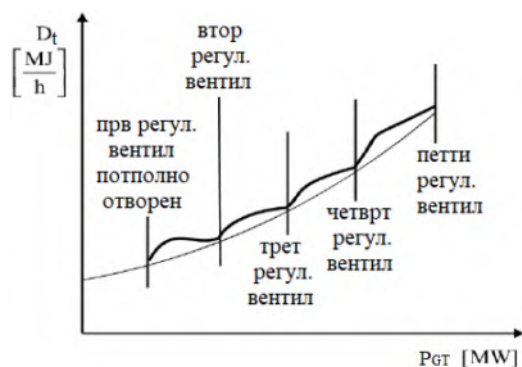
Врз основа на наведените основните енергетски карактеристики се дефинира карактеристиката на специфична потрошувачка на топлина на термоагрегатот:

$$d_T(P_{gt}) = \frac{D_t(P_{gt})}{P_{gt}} \text{ [MJ / MWh]} \tag{2.18}$$

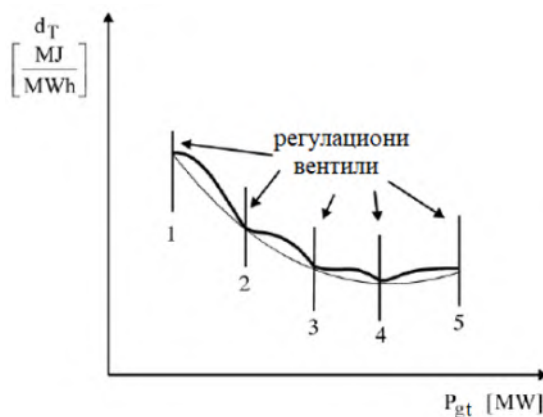
како и карактеристиката на диференцијалниот прираст на потрошувачката на топлина

$$\delta_T(P_{gt}) = \frac{d(D_t(P_{gt}))}{D_t P_{gt}} \text{ [MJ/MWh]} \tag{2.19}$$

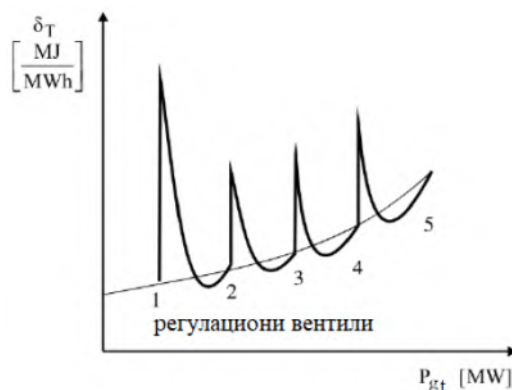
каде  $D_t(P_{gt})$  е изразено во [MJ/h], а моќноста на прагот на термоагрегатот  $P_g$  во [MW].



Слика 2.8 Основна енергетска влезно - излезна карактеристика на кондензациона термоелектрана



Слика 2.9 Карактеристика на специфичната потрошувачка на топлина на термо блок на кондензациона термоелектрана



Слика 2.10 Карактеристика на диференцијалниот прираст на потрошувачка на топлина на термо блок на кондензациона термоелектрана

Основната енергетска влезно – излезна карактеристика и изведените енергетски карактеристики за специфичната потрошувачка на топлина и диференцијалниот прираст на потрошувачката на топлина, во случај на кондензациона термоелектрана, се дадени на сликите 2.8, 2.9 и 2.10 респективно.

Дисконтинуитетите на сликите 2.8, 2.9 и 2.10 се последица на наглиот пораст на загубите во млазниците на парната турбина, при пуштање пареа во турбината, со повеќе регулациони вентили. Овие карактеристики се добиваат со сложени експериментални испитувања или со процени врз база на погонските испитувања. Во планирањето и експлоатацијата на термоцентралите, можат да се користат континуални форми на овие карактеристики, во вид на полиномни криви.

### 2.2.3 Апроксимација на енергетските карактеристики на термоелектраната

Претставувањето на влезно – излезните карактеристики со задоволителна точност може да се постигне со апроксимација на погонските карактеристики на парните термо блокови, со квадратна карактеристика т.е. полином од втор ред. Според тоа, кривата на потрошувачка на топлина се апроксимира со квадратна парабола од облик:

$$D_t(P_{GT,t}) = a_t^D + b_t^D \cdot P_{GT,t} + c_t^D \cdot P_{GT,t}^2 \quad (2.20)$$

Каде што  $a_t^D$  [MJ/h],  $b_t^D$  [MJ/MWh] и  $c_t^D$  [MJ/(MW)<sup>2</sup>h] претставуваат константи за кривата на потрошувачка на топлина на термоелектраната  $t$ [81 - 84].

### 2.2.4 Модел на термоелектрана

Во термоелектраната, при промена на моќноста на агрегатот, доаѓа до промена на погонските трошоци за работа. Во математичкото моделирање на термоелектраната во оваа докторска дисертација, погонските трошоци за работа базирани на трошоците за гориво, за секоја производна единица, се претставуваат со неконвексна функција на трошоци што го уважува valve point ефектот, т.е.[81 - 84]:

$$F_t(P_{GT,t}) = a_t + b_t \cdot P_{GT,t} + c_t \cdot P_{GT,t}^2 + \left| d_t \times \sin \left( e_t \times (P_{GT,t}^{\min} - P_{GT,t}) \right) \right| \quad (2.21)$$

каде за  $t = 1, \dots, NT$ :

$F_t(P_{GT,t})$  - функција на трошоците за гориво во зависност од моќноста на генераторот  $t$  [€/h]

$a_t, b_t, c_t, d_t, e_t$  - константи на кривата на трошоци за гориво на термоелектраната  $t$

$P_{GT,t}$  - моќност на генераторот  $t$  [MW]

### 2.2.5 Основни технички ограничувања на термоелектраните

За секоја производна термо единица се уважува дозволеният опсег на работа, односно генераторското ограничување:

$$P_{GT,t}^{\min} \leq P_{GT,t,j} \leq P_{GT,t}^{\max} \quad (2.22)$$

каде

$P_{GT,t}^{\min}, P_{GT,t}^{\max}$  - минимална, односно максимална моќност на генераторот  $t$  [MW]

$P_{GT,t,j}$  - моќност на генераторот  $t$  во временскиот интервал  $j$  [MW]

Во пракса, брзината на промена (намалување или зголемување) на моќноста на генераторот т.е. ramp rate limit, е ограничена со погонските и механичките можности на агрегатот. Ова ограничување, заедно со сите останати круцијални ограничувања, кои се уважени во оваа докторска дисертација, ќе бидат детално прикажани и моделирани заедно со оптимизациониот проблем во наредните поглавја.

## 2.3 ВЕТЕРНИ ЕЛЕКТРАНИ

### 2.3.1 Статистички показатели на ветерната енергија

Основниот предуслов за анализа на економската оправданост за развојот на проектот за ветерни електрани, е доверливо познавање на ресурсите на ветерната енергија на локацијата каде ќе биде проектирана ветерната електрана [85-88]. За да се изврши анализа на ресурсите на ветерната енергија, неопходно е да се изврши мерење на потребните параметри со помош на соодветна мерна опрема. Брзината на ветрот мора да се мери со мерна опрема со висока класа на точност, бидејќи и при мала грешка во мерењето, со оглед на тоа што моќноста на ветрот зависи од неговата брзина, се јавува голема грешка во мерењето на моќноста на ветрот, а со тоа и во проценката на годишното производство од самата ветерна електрана. Покрај брзината на ветрот, при испитување на ресурсите на енергијата на ветрот, потребно е да се врши мерење на насоката на дување на ветрот, температурата на воздухот и атмосферскиот притисок. Најмалиот период на мерење на брзината на ветрот на некоја локација е една година, со цел да се опфати сезонската варијација на климата на дадената локација. Во ветроенергетиката е усвоен еден просечен интервал на измерените величини од 10 минути, така што сумарните податоци измерени во текот на една година, содржат 52.560 временски еднакво оддалечени записи. Бројот на податоци во еден запис (кој одговара на околу 10 минути од интервалот) зависи од бројот на сензори што се инсталирани на мерниот столб. За секој сензор (анемометар, покажувач на насоката на ветрот, ...) во секој десетминутен интервал, се запишуваат 4 податоци а тоа се:

- средна десетминутна вредност на измерената величина,
- максимална средна двесекундна вредност,

- минимална средна двесекундна вредност,
- стандардна девијација на измерените величини.

По завршувањето на мерењето, потребно е да се изврши анализа на измерените податоци, при што сите невалидни податоци се бришат (пр. поради замрзнување на опремата).

Статистичката анализа на измерените податоци може да се добие од показателите за ресурсите на ветерната енергија на мерното место и мерната висина. Основните статистички показатели се:

- ружа на ветрот,
- средна годишна брзина на ветрот,
- хистограм на брзината на ветрот,
- функција на густината на распределба на веројатноста на појава на ветер.

### 2.3.1.1 Средна брзина и густина на моќност на ветрот

Собраните податоци за брзината на ветрот за одреден период содржи  $N_w$  еквивалентни записи (пр.  $N_w=52560$  десетминутни интервали во текот на една година). Средната брзина на ветрот  $\overline{V}_w$  на мерната локација што одговара на збирните  $N_w$  еквивалентни податоци за брзината на ветрот ( $V_{w,i}$ ) се пресметува според релацијата [85- 88]:

$$\overline{V}_w = \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} V_{w,i} \quad (2.23)$$

Средната густина на моќноста на ветрот  $\overline{P}_w$  на набљудуваниот мерен хоризонт (пр. една година) е дефинирана според следната релација:

$$\overline{P}_w = \frac{1}{2} \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} \rho_w V_{w,i}^3 \quad (2.24)$$

каде што

$\overline{V}_w$  - средна брзина на ветрот од дадената насока во текот на една година [m/s]

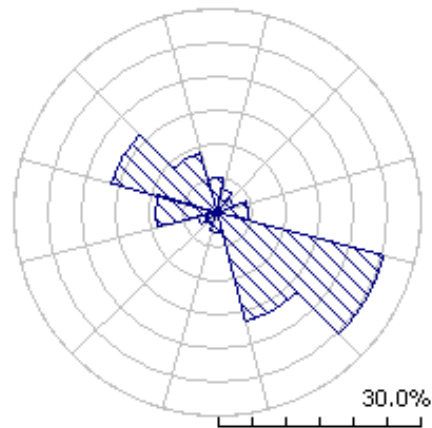
$\overline{P}_w$  - средна густина на моќност на ветрот од дадената насока во текот на една година [MW]

Во претходната релација е предвидено густината на ветрот  $\rho_w$  да се менува поради промената на притисокот и температурата на воздухот. Пресметката на густината на воздухот на секој десетминутен интервал  $i$  се врши на основа на мерните податоци за притисокот и температурата на воздухот.

### 2.3.1.2 Ружа на ветрови

Ружата на ветрови претставува еден вид дијаграм со кој се опишува зачестеноста на појавата на ветер од одредена насока. Целиот хоризонт ( $360^\circ$ ) се дели на 12 делови (секој дел одговара на површина од  $30^\circ$ ). Референтната оска, според која се пресметува

насоката на ветерот, е север. Референтната оска ја покажува оската на симетрија на првиот дел, односно првиот дел зафаќа агол од  $345^\circ$  до  $15^\circ$ , вториот од  $15^\circ$  до  $45^\circ$  итн., а дванаесеттиот дел зафаќа агол од  $315^\circ$  до  $345^\circ$ . Врз основа на измерените податоци за насоката на ветерот, за секој дел се пресметува процентуалната зачестеност на појава на ветерот чијашто насока припаѓа на тој дел (процентите се дефинирани во однос на набљудуваниот временски период за кој се однесуваат мерните податоци). Постојат различни графички прикази на ружата на ветрови. На сликата 2.11 е прикажан примерок за ружата на ветрови добиена со помош на софтверот WAsP врз основа на мерните податоци за време од две години и тоа за брзината и насоката на ветерот на висина од 60m [85-88].

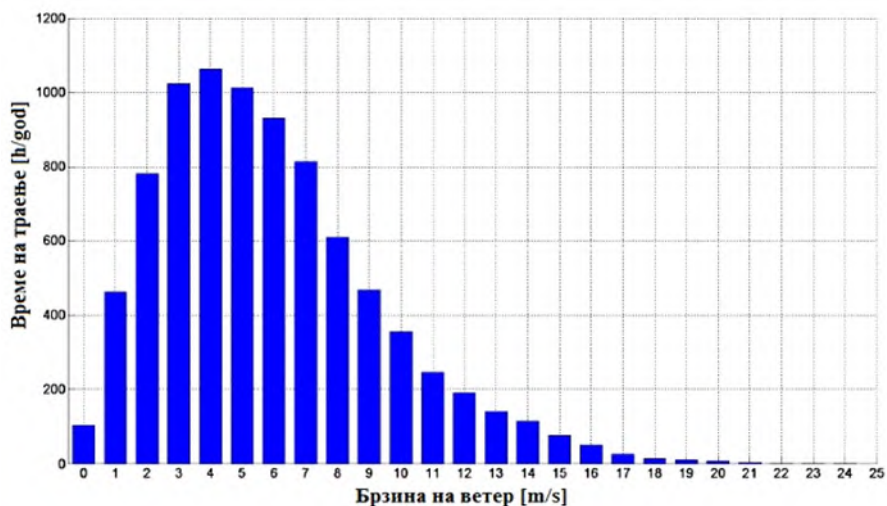


Слика 2.11 Ружа на ветрови добиена врз основа на мерни податоци на висина од 60 m

Во ветроенергетиката информацијата за зачестеноста на појавата на ветер од одредена насока не е доволна. Потребна е и информација за просечната брзина и моќноста на ветерот од дадената насока, па за секој дел графички или табеларно се запишува податок за средната брзина на ветерот од дадената насока и средната густина на моќноста на ветерот во тој дел.

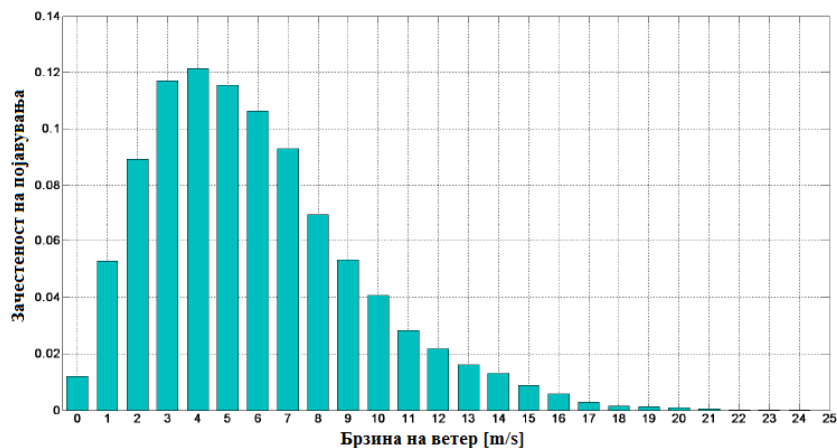
### 2.3.1.3 Дискретен хистограм за брзината на ветерот

Информацијата за средната годишна брзина на ветерот не е доволна за проценка на производството на електрична енергија од некој ветрогенератор. Потребно е да се знае колку време ветерот дува со одреден интензитет. Таа информација ја дава хистограмот за брзина на ветер [85-88]. За да се формира дискретниот хистограм за брзина на ветер, потребно е од векторот на десетминутните мерни податоци за одреден анемометар да се одделат десетминутни интервали во кои ветерот дувал помеѓу  $V_{w,j} - 0,5 \text{ m/s}$  и  $V_{w,j} + 0,5 \text{ m/s}$ , каде  $V_{w,j} = (0, 1, 2, \dots, V_{w,\max})$  се целобројни вредности за брзината на ветерот. Со собирање на десетминутните интервали се добива вкупното времетраење на брзината на ветерот  $V_{w,j}$  ( $V_{w,j} - 0,5 \text{ m/s}; V_{w,j} + 0,5 \text{ m/s}$ ). Ветровите чијашто брзина е  $V_w \leq 0,5 \text{ m/s}$  се третираат како тишина. На слика 2.12 е прикажан дискретен хистограм за брзината на ветерот добиен врз основа на мерења на брзината на ветерот во текот на две години на висина од 60 m.



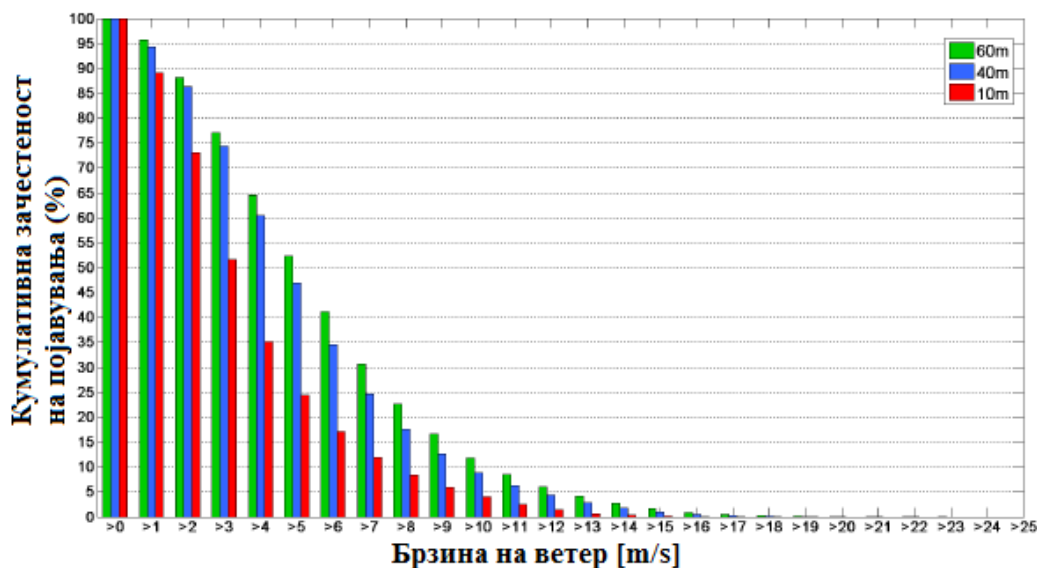
Слика 2.12 Ружа на ветрови добиена врз основа на мерни податоци на висина од 60m

Ако вредностите на ординатната оска се поделат со 8760 h (доколку хистограмот се однесува на временски период од една година), се добива нормализиран хистограм за брзина на ветер, кој е прикажан на слика 2.13. На ординатната оска на нормализираниот дијаграм се наоѓаат релативните вредности за фреквенцијата т.е. зачестеноста на појавата на ветер со одредена брзина.



Слика 2.13 Ружа на ветрови добиена врз основа на мерни податоци на висина од 60 m

Еден од начините за статистичко претставување е подреден дијаграм за кумулативно траење на брзината на ветрот. На слика 2.14 е прикажан подреден дијаграм за кумулативно траење на брзината на ветрот добиен врз основа на мерења на брзината на ветрот во текот на две години на различни висини од тлото.



Слика 2.14 Подреден годишен дијаграм за кумулативно траење на брзината на ветрот на различни висини над тлото

### 2.3.1.4 Weibull-ова функција на распределба на веројатност за брзина на ветрот

Нормализираниот дискретен хистограм на брзината на ветрот може да се опише со некоја функција на распределба на густината на веројатност. Се покажало дека за карактеризација на статистиката на брзината на ветрот погодно е да се користи Weibull-овата статистика т.е. двопараметарска Weibull-ова функција на густина на распределба на веројатноста што е дефинирана со следната функција [85-88]:

$$f(V_w) = \frac{k_{wei}}{c_{wei}} \left( \frac{V_w}{c_{wei}} \right)^{k_{wei}-1} \cdot e^{-\left( \frac{V_w}{c_{wei}} \right)^{k_{wei}}}, \quad V_w > 0 \quad (2.25)$$

каде што:

$k_{wei}$  – фактор на облик на Weibull-овата функција

$c_{wei}$  – фактор на скалирање на Weibull-овата функција.

Од Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност, може да се добие функцијата на кумулативна распределба на веројатност што е дефинирана со релацијата:

$$F(V_w) = 1 - e^{-\left( \frac{V_w}{c_{wei}} \right)^{k_{wei}}}, \quad V_w > 0. \quad (2.26)$$

Со изедначување на функцијата на кумулативна распределба на веројатност по  $p$ , каде  $0 < p < 1$ , се добива инверзната функција на кумулативна распределба на веројатност, т.е.:

$$F^{-1}(V_w) = \left( -c_{wei} \ln(1-p) \right)^{\frac{1}{k_{wei}}}, \quad 0 < p < 1. \quad (2.27)$$

Конечно, одредувањето на брзината на ветрот  $V_w$  при произволна веројатност  $p$ , во случај да се познати параметрите  $k_{wei}$  и  $c_{wei}$ , се врши според следната релација:

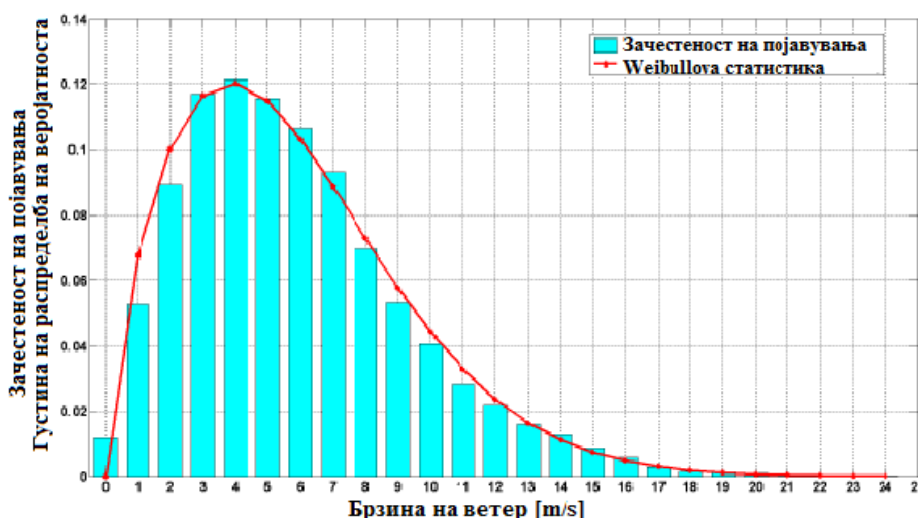
$$V_w = (-c_{wei} \ln(1-p))^{1/k_{wei}}, \quad 0 < p < 1 \quad (2.28)$$

или во попрктична форма

$$V_w = \left( \log \left( \frac{1}{1-p} \right) \right)^{1/k_{wei} \cdot c_{wei}}, \quad 0 < p < 1. \quad (2.29)$$

Изразот (2.29) е од исклучително значење за оваа докторска дисертација, бидејќи тој ќе биде имплементиран во методот Монте Карло, за пресметка на случајни брзини на ветер (а со тоа и случајни моќности на ветерната електрана), за сценарија со генериран рамномерно распределен случаен број, т.е. случајно генерирана веројатност за појава на ветер.

На сликата 2.15 е прикажан нормализиран хистограм на брзина на ветер од сликата 2.13 и Weibull-овата статистика т.е. Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатноста за брзината на ветрот.



Слика 2.15 Weibull-ова функција на густина на распределба на веројатноста за појава на брзината на ветрот на висина од 60 m

Функцијата на густина на распределба на веројатноста ја дефинира веројатноста за појавување ветар со одредена брзина. Површината помеѓу кривата  $f(v)$  и апсисната оска е еднаква на 1, бидејќи веројатноста дека ветрот ќе дува во опсегот од 0 до  $\infty$  е еднаква на 1. Веројатноста дека ветерот ќе дува со брзина помала од некоја брзина  $V_w$  одговара на површината помеѓу делот од кривата и апсисната оска до вредност  $V_w$  и дефинирана е со релацијата [85-88]:

$$P(V_w < V_{w,x}) = F(V_{w,x}) = \int_0^{V_{w,x}} f(V_w) dV_w = 1 - e^{-\left(\frac{V_{w,x}}{c_{wei}}\right)^{k_{wei}}}. \quad (2.30)$$

Веројатноста дека ветерот ќе дува со брзина поголема од  $V_{w,x}$ , е дефинирана со релацијата:



$$P(V_w > V_{w,x}) = 1 - F(V_{w,x}) = 1 - \left( 1 - e^{-\left(\frac{V_{w,x}}{c_{wei}}\right)^{k_{wei}}} \right) = e^{-\left(\frac{V_{w,x}}{c_{wei}}\right)^{k_{wei}}}. \quad (2.31)$$

Средната вредност на брзината на ветерот е дефинирана со релацијата:

$$\bar{V}_w = \int_0^{\infty} V_w \cdot f(V_w) dV_w = k \cdot \int_0^{\infty} \left(\frac{V_w}{c_{wei}}\right)^{k_{wei}} \cdot e^{-\left(\frac{V_w}{c_{wei}}\right)^{k_{wei}}} dV_w = c_{wei} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k_{wei}}\right) \quad (2.32)$$

каде што  $\Gamma$  е стандардна гама-функција ( $\Gamma_n = \int_0^{\infty} e^{-x} \cdot x^{n-1} dx$ ). Средната густина на моќноста на ветерот е дефинирана со следната релација:

$$\bar{P}_w = \frac{1}{2} \rho_w (\bar{V}_w^3) = \frac{1}{2} \rho_w \int_0^{\infty} V_w^3 f(V_w) dV_w = \frac{1}{2} \rho_w c_{wei}^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k_{wei}}\right) = \frac{1}{2} \rho_w \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k_{wei}}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{3}{k_{wei}}\right)} \bar{V}_w^3. \quad (2.33)$$

Изразот (2.29) укажува на фактот дека средната густина на моќноста на ветерот на некоја произволна локација може да се пресмета ако се познава средната годишна густина на воздухот  $\rho_w$ , брзината на ветерот и факторот на облик  $k_{wei}$  на соодветната Weibull-ова функција на густина на распределба на веројатноста.

Постојат повеќе нумерички методи за одредување на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатноста, врз основа на низа расположливи мерни податоци за брзината на ветерот. Примената на секоја од методите доведува до одредена грешка. Една од најточните методи е методата на максимална веројатност (*maximum likelihood method*). Релациите со коишто се одредуваат факторот на облик  $k_{wei}$  и факторот на скалирање  $c_{wei}$ , се:

$$k_{wei} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N_w} V_{w,i}^k \cdot \ln(V_{w,i})}{\sum_{i=1}^{N_w} V_{w,i}^k} - \frac{\sum_{i=1}^{N_w} \ln(V_{w,i})}{N_w} \right]^{-1}, \quad (2.34)$$

$$c_{wei} = \left[ \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} V_{w,i}^{k_{wei}} \right]^{\frac{1}{k_{wei}}}, \quad (2.35)$$

каде што

$N_w$  – број на процесирани десетминутни интервали

$V_{w,i}$  – средна десетминутна вредност на брзината на ветерот во  $i$ -тиот десетминутен интервал [m/s]

Решавањето на равенството (2.34) се врши со нумерички итеративен метод. По одредувањето на вредноста на факторот на облик, може да се одреди и факторот на скалирање, притоа користејќи ја релацијата (2.35).

За започнување на итеративниот процес треба да се усвои почетно решение за факторот на облик  $k_{wei}$ . Со цел да се скрати итеративниот процес, за почетно решение на факторот на облик може да се усвои вредноста добиена со помош на методата на енергетски примерок (*energy pattern factor method*):

$$E_{pf} = \frac{\overline{(V_w^3)}}{(\overline{V_w})^3}. \quad (2.36)$$

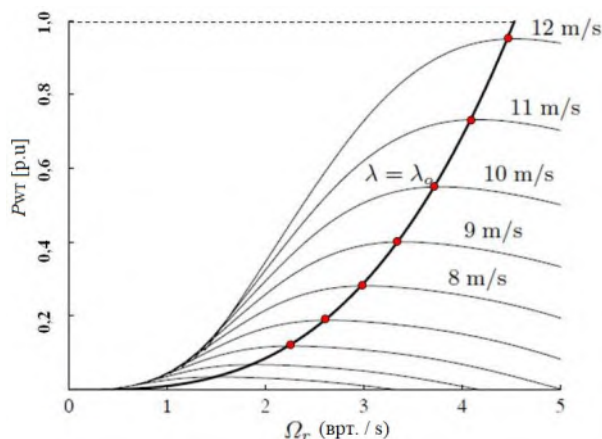
Според тоа, почетното решение за факторот на облик ќе изнесува:

$$k_{wei, poc} = 1 + \frac{3,69}{E_{pf}}. \quad (2.37)$$

Во оваа докторска дисертација, равенството (2.30), се решава со итеративниот метод на Newton (кој ќе биде прикажан во следните поглавја), при што за почетно решение се усвојува вредноста добиена со помош на релацијата (2.33).

### 2.3.2 Енергетска карактеристика на ветерната турбина

Основната стратегија на управување кај ветерните турбини е одржување максимална ефикасност во реални услови на промена на брзината на ветрот. На сликата 2.16 се прикажани криви на коефициентот на моќност во функција од брзината на вртење, за различни брзини на ветер. За секоја брзина на ветер постои оптимална брзина на вртење на ветерната турбина, при којашто се постигнува максимален степен на искористување (точките при максимално искористување се прикажани со црвена боја на графикот) [85, 87, 89].



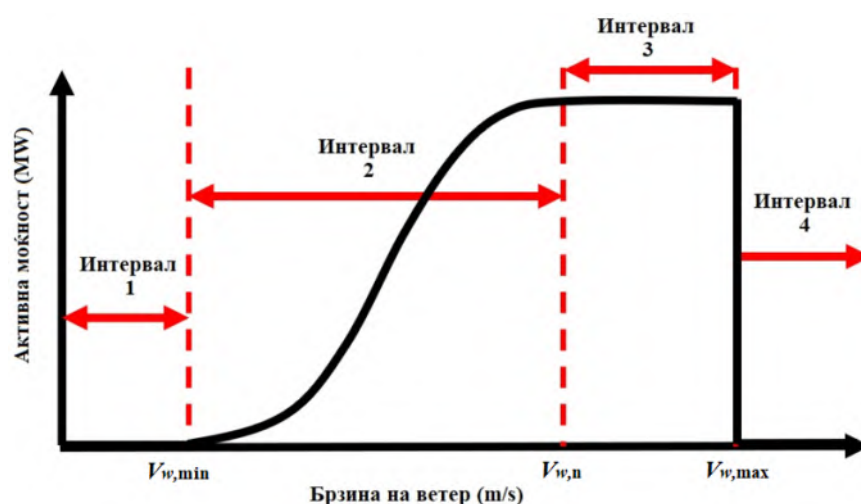
Слика 2.16 Криви на коефициентот на моќност во функција од брзината на вртење при различни брзини на ветер

Со цел коефициентот на конверзија на моќноста на ветрот во механичка моќност на вратилото на турбината да биде максимален, потребно е приспособување на брзината на вртење на ветерната турбина според брзината на ветрот, односно следење на кривата на максимална моќност. Стратегијата за одржување на максималната моќност е прифатлива за брзини на ветер при кои моќноста на вратилото на турбината, не е поголема од номиналната моќност, т.е.  $P_{WT} \leq P_{WTn}$ . Кога ќе се достигне номиналната моќност на турбината, односно  $P_{WTn} = 1$  р.у. според сликата 2.16, секое понатамошно зголемување на моќноста на турбината би значело преоптоварување на елементите на

ветроагрегатот, пред сè на генераторот. Според тоа, по достигнување на номиналната моќност, се менува стратегијата на управување на ветерната турбина.

На слика 2.17 е прикажана енергетската карактеристика т.е. кривата на моќност за ветерна турбина, на којашто се прикажани четири интервали, односно:

- Интервал 1 во кој ветерната турбина е закочена поради недоволна брзина на ветер,
- Интервал 2 е работен опсег во кој се одржува стратегија за максимален степен на искористување,
- Интервал 3 е работен опсег во кој се одржува стратегија за константна т.е. номинална моќност,
- Интервал 4 во кој ветерната турбина е закочена поради преголема брзина на ветер.



Слика 2.17 Енергетска карактеристика на ветерна турбина со назначени карактеристични интервали

Нормалното оперативно подрачје на ветроагрегатот е дефинирано со три карактеристични брзини на ветрот, односно [85, 87, 89]:

- минимална работна брзина  $V_{T,min}$  (анг. cut-in wind speed) е брзина на ветрот при којашто ветроагрегатот почнува со производство на електрична енергија. За брзини на ветрот  $V_w < V_{T,min}$ , ветерната турбина е закочена. Вообичаената вредност на брзината на вклучување кај трокраките ветерни турбини е  $V_{T,min} = (2,5 \div 4)$  m/s.
- номинална работна брзина  $V_{T,n}$  (анг. nominal wind speed) е минимална брзина на ветрот при којашто ветроагрегатот ја достигнува својата номинална моќност. Номиналната брзина за ветроагрегат за локации со слаб ветер изнесува  $V_{T,n} = (10 \div 13)$  m/s, а за ветроагрегат за локации со силен ветер изнесува  $V_{T,n} = (14 \div 17)$  m/s.
- максимална работна брзина  $V_{T,max}$  (анг. cut-out wind speed) е брзина на ветрот при којашто ветерната турбина се исклучува од погон. Брзината на исклучување најчесто изнесува  $V_{T,max} = 25$  m/s.

### 2.3.3 Основно техничко ограничување на ветерните електрани

При мали брзини на ветер (интервал 1 на сликата 2.17) кинетичката енергија на ветрот е мала (поради кубната зависност од брзината на ветрот) и работата на ветерната турбина во оваа област е технички и економски неоправдана. Од технички аспект, работата на ветерната турбина во интервалот 1 би била нестабилна, бидејќи погонскиот момент е мал, па ветроагрегатот би работел на границата на моторен режим. Од економска страна, исто така не е оправдана работата во интервал 1. Ветроагрегатот при работа бара одредена електрична енергија (потребна за работа на различните контролно-управувачки и помошни системи), па преземената моќност од мрежа за сопствени потреби најчесто би била поголема од излезната моќност на ветроагрегатот, при брзини на ветрот  $V_w < V_{T,\min}$ . Од наведените причини, ветроагрегатот во интервалот 1 е закочен, односно [85, 87, 89]:

$$P_{GW,w}(V_w < V_{T,\min}) = 0, \quad w = 1, 2, \dots, NW. \quad (2.38)$$

Во интервалот 2 на сликата 2.17 се одржува максимален степен на искористување, така што кривата на моќност во оваа област во овој интервал може да се прикаже со релацијата:

$$P_{GW,w}(V_{T,\min} \leq V_w \leq V_{T,n}) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_{P_{\max}} V_w^3, \quad w = 1, 2, \dots, NW. \quad (2.39)$$

За брзини на ветрот што се поголеми од номиналната брзина на ветерната турбина, т.е. за интервалот 3 на сликата 2.17, се напушта стратегијата за максимална моќност и ветерната турбина аеродинамички контролирано се кочи, со цел излезната моќност на ветроагрегатот да се одржи на номиналната вредност, односно:

$$P_{GW,w}(V_{T,n} \leq V_w \leq V_{T,\max}) = P_{GWn,w}, \quad w = 1, 2, \dots, NW. \quad (2.40)$$

Што се однесува до интервалот 4 на сликата 2.17, при многу големи брзини на ветрот, од сигурносни причини ветерната турбина се исклучува од погон, па излезната моќност на ветроагрегатот е:

$$P_{GW,w}(V_w > V_{T,\max}) = 0, \quad w = 1, 2, \dots, NW. \quad (2.41)$$

# МЕТОДА МОНТЕ КАРЛО

---

Поглавје

3

## 3 МЕТОДА МОНТЕ КАРЛО

### 3.1 ВОВЕД

Нумеричката метода, позната како Монте Карло метода, може да се дефинира како статистичка симулациона метода кај којашто се употребуваат низа случајни броеви за извршената симулација. Системската употреба на методата и нејзиниот назив потекнуваат уште од 40-тите години на минатиот век од школата за математика и физика во Las Alamos, а посебно во работата на Von Neuman, Ulam, Metropolis, Fermi и Kana. Заслугата за создавањето на Монте Карло методата му се припишува на полскиот математичар Stanislav Ulam. Играјќи ја познатата игра со карти “solitaire”, се обидел да дознае колкави се шансите 52 карти да се поделат за да се победи во играта. После долго време потрошено на испитување на комбинации на решенија, почнал да се прашува дали постои едноставно решение за дадениот проблем. Воочил дека е многу поедноставно да се поделат картите сто пати, па да се пребројат колку успешни обиди има. Таа постапка на човекот би му одземала многу време, но со помош на калкулатор до резултатот би се дошло релативно брзо. Тоа на Ulam му дало идеја како да ги приспособи процесите опишани со диференцијални равенки во еквивалентен облик што се заснова на операции со случајни броеви. Работејќи со Von Neuman и Metropolis, измислил алгоритам за програмска имплементација, при што се обидел да најде начин сите проблеми кои немаат карактер и облик, да се претворат во облик погоден за статистички примерок. Metropolis ја именувал новата метода според името на градот Монте Карло, познат по коцкарниците, во кои во игрите на среќа најчесто се користи рулет, за кој може да се каже дека произведува случајни броеви. Von Neuman и Ulam, решавајќи ги проблемите со големи комплексности, увиделе дека резултатите не можат да се добијат по аналитички пат, а спроведувањето на експериментите би било многу скапо, па пристапиле кон користење на Монте Карло техниката. На тој начин дошле до математички решенија на детерминистички проблеми со симулирање на стохастички процеси, кои имале распределба на веројатност што ги задоволува математичките релации за дадениот детерминистички проблем. Монте Карло симулацијата ги отсликува стохастичките процеси кај кои времето не игра улога. Монте Карло методата е позната како „статистичко упростување“ и метода на современ начин на моделирање на податоците при обиди. Монте Карло методата се заснова на употребата на случајни броеви и статистичка веројатност. Во последните неколку години Монте Карло методата добива статус на целосно нумеричка метода погодна за решавање на најкомплексни проблеми во сите сфери на науката, па и во енергетиката [90].

Начинот на употреба на оваа метода варира од областа, но за да се нарече некоја метода Монте Карло во експериментот, доволно е да се користат случајни броеви за истражување на некој проблем. Решавањето равенки што го опишуваат односот помеѓу две појави е прилично едноставно, но решавање исти равенки за сто или илјада случаи е невозможно. Решението се добива со случајно земање примероци на врски или интеракции додека не се појави резултат. Затоа, механизмот на изведување резултати вклучува бројни повторувања експерименти или пресметки. Монте Карло методата станала многу значајна во развојот на калкулаторите и табеларните софтвери што овозможуваат нејзино брзо извршување. Основна идеја од која се почнува во оваа метода се веќе познатите податоци, а тоа се однесува на познатата функција на густина на распределба на веројатноста на влезните стохастички променливи што ја опишуваат еволуцијата на дадениот систем и што се одредуваат преку генератори на случајни броеви и како такви влегуваат во потребната пресметка. Предностите на оваа метода се

повеќекратни. Овозможува подобро разбирање на системот, експериментирање со моделот на системот и подготовка за непознати ситуации при функционирање на системот, овозможува откривање тесни патишта, проценува различни случаи и подобра подготовка за донесување одлука во случај на ризик.

Областа на примена во делот на енергетиката може да биде инженерска економија, прогноза на потрошувачката, планирање на производството, планирање на мрежата, доверливост и проценка на ризици. Методата може да се примени во секоја пресметка во областа на енергетиката каде што одредени величини се утврдуваат со одредена неизвесност. Исто така, методата е прикладна за употреба при пресметка со величини што се мерат со некоја грешка. Ако напонот се мери со грешка од 5%, а струја 3%, се поставува прашањето пресметка на моќноста како производ од две неизвесни величини. Монте Карло методата подразбира земање примероци за струјата од интервалот  $[0,97I_{\text{mereno}}; 1,03 I_{\text{mereno}}]$  и примероци за напонот од интервалот  $[0,95 U_{\text{mereno}}; 1,05 U_{\text{mereno}}]$ . Бројот на примероци го претставува бројот на пресметка на производот, моќноста, а воедно го претставува и бројот на симулации со Монте Карло методата. Распоредот на примероци во споменатите интервали е случаен. Резултатот од методата е полн со вредности за моќноста и распределба на вредностите на моќноста. Со примената на методата се земени предвид незвесноста при мерењето што зависи од човековите грешки и грешките на мерните уреди. Колку е практична Монте Карло методата, може да се види од следниот пример. Претпоставуваме дека бројот на стохастички параметри на моделот е 10, а бројот на можни вредности за секој од тие параметри е 3 и дека ја означуваат минималната, најверојатната и максималната вредност. Во тој случај, за да ја оценеме мерката на перформанси на системот, бројот на пресметки што мора да се извршат за да се проценат сите комбинации можни вредности е  $3^{10}=59\ 049$ . Тоа е можно само ако процесот на пресметка е автоматизиран, а одзема доста време. Ако бројот на параметри порасне на само 15, бројот на пресметка расте на околу 14 милиони ( $3^{15}=14\ 348\ 907$ ) што е потешко, односно неостварлива пресметка. Решението е со употреба на Монте Карло симулација. Во однос на вредностите на стохастичките параметри од соодветните распределби, може да се проценат перформансите на системот со голем број стохастички параметри со релативно мал број повторувања. Всушност, 1.000 повторувања се доволни за проценка на излезот на моделот без оглед на бројот на комбинации на можните вредности на стохастичките параметри. Бројот на итерации влијае на времето на траење на симулацијата, квалитетот и точноста на резултатот. Колку е поголем бројот на итерации, распределбата на веројатност на моделот станува постабилна, а статистиката е сè помала и помала со секоја дополнителна итерација. Важно е да се направат доволен број итерации со цел распределбата на веројатност на излезната променлива да би била посигурна. Со зголемување на бројот на итерации се доаѓа до точка кога статистиката престанува значително да се менува, така што не е потребно да се троши време за дополнителна итерација.

Употребата на Монте Карло методата е еден од најдобрите примери за креативно користење на пресметките како истражувачка алатка. Поддржува исклучително голем број математички дисциплини од теоријата на веројатност до теоријата на големи броеви. Монте Карло методата зависи од употребата на теоријата на веројатност, но во суштина е различна од неа. Во теоријата на веројатност равенките се изведуваат од теоретски претпоставки базирани на случајност. Монте Карло методата има најголема смисла за користење во проблеми и ситуации:

- кои зависат од случајното опкружување, а не постои можност за изведување аналитички израз,

- во кои физичките експерименти се непрактични или е невозможно да се направат и
- во кои точната равенка е претешка или невозможна за решавање со употреба на други техники.

### 3.2 ДЕФИНИЦИЈА НА МЕТОДОТ

Монте Карло методата овозможува генерирање на случајни броеви од голем број вредности кои одредуваат различни карактеристични величини. Случајните вредности на величините се јавуваат со одредена веројатност [90-92]. Ако се направени  $m$  симулации во кои се одредува величината  $Z$ , средната вредност на таа величина е:

$$z^* = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m z_k, \quad (3.1)$$

каде што:  $z_k$  – големина на случајна вредност на величина  $Z$  во симулација  $k$ . Ако величините  $z_k$  се добиени помеѓу меѓусебно независни симулации, тогаш за математичкото очекување  $E(Z)$  важи:

$$P \left\{ \left| E(Z) - z^* \right| < \beta \frac{s_1}{\sqrt{m}} \right\} \approx \gamma, \quad (3.2)$$

$$\gamma = 2 \cdot \Phi_0(\beta) \quad (3.3)$$

$$\Phi_0(y) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cdot dt \quad (3.4)$$

$$s_1 = \left[ \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (z_k - z^*)^2 \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

Во претходните релации  $s_1$  е стандардното отстапување на математичкото очекување на случајната променлива  $Z$  што се совпаѓа со асимптотски нормално распределената величина  $z^*$ . Параметрот  $\gamma$  е ниво на доверба, а  $\Phi_0$  е таблична функција. Во практичните анализи споменатата формула важи за над 30 симулации, а нивото на верување што се усвојува е обично 0,9 или 0,95.

Табела 3.1 Вредност на параметрот за дадени вредности на нивото на доверба

$\gamma$	0,80	0,85	0,90	0,95	0,995
$\beta$	1,281	1,440	1,645	1,960	2,801

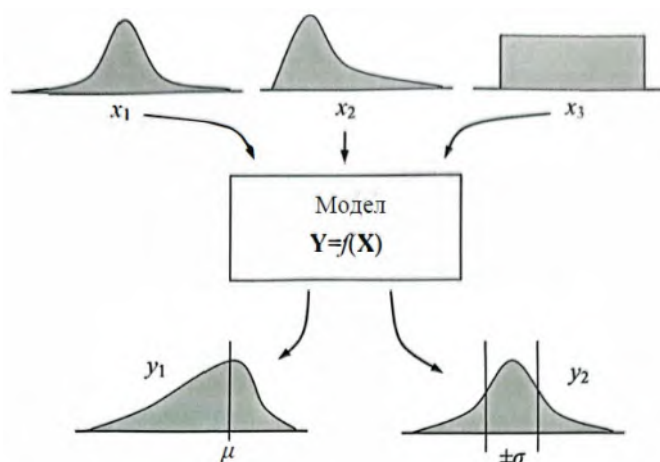
Математичкото очекување на случајната величина  $Z$ , со веројатност  $\gamma$  се наоѓа во границите на интервалот на доверба:

$$z^* - \beta \frac{s_1}{\sqrt{m}} \leq E(Z) \leq z^* + \beta \frac{s_1}{\sqrt{m}} \quad (3.6)$$

Со помош на претходната релација може да се утврди со која веројатност може да се очекува некоја вредност на променлива во одреден опсег на вредности. Во многу примени на Монте Карло методата, физичкиот процес се симулира директно и нема потреба од испишување равенка што го опишува дејствувањето на системот. Единственото решение е да физичкиот (или математички) модел да се опише со помош



на функцијата на густина на распределба на случајни променливи во моделот. Под претпоставка дека системот е опишан со помош на функција на густина на распределба на веројатност, се користи Монте Карло симулацијата која врши случајно доделување на вредности од функцијата на распределба на случајни променливи. Се врши голем број на симулации т.е. сценарија, а посакуваниот резултат се добива како средна вредност кога во обсервација се земаат сите сценарија. Оваа метода може да се надогради со мал број знаења или познавање на самиот систем. Бидејќи системот се опишува со помош на функцијата на распределба на густината на веројатност, неопходно е да се избере добра распределба што се бира врз основа на податоците со кои веќе се располага. Податоците добиени со симулацијата може да се презентираат преку карактеристичните статистички вредности или графички преку дијаграмите како на Слика 3.1. Таа го прикажува процесот како од можните услови на однесување, кои се зададени преку очекуваните функции на густината на распределба на веројатност, се доаѓа до податоците со кои може да се манипулира и анализира некој модел.



Слика 3.1 Процес на Монте Карло симулација

### 3.3 СЛУЧАЈНИ БРОЕВИ

Основната претпоставка за примена на Монте Карло методата е дека постои низа независни случајни променливи со униформна распределба на интервалот  $[0, 1]$ . Ова се нарекува низа на случајни броеви. Почнувајќи од низа случајни броеви, може да се генерира низа со произволен број на распределба и може да се симулираат разни модели во кои има случајни зависни или независни променливи [91, 92]. Ако децималните цифри на еден број се независни случајни цифри, тогаш тој број е случаен број. За добивање случајни цифри и случајни броеви се користат три начини:

- табела на случајни броеви
- генератори на случајни броеви и
- метода псевдослучајни броеви

### 3.4 ТАБЕЛА НА СЛУЧАЈНИ БРОЕВИ

Независните случајни цифри 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 можат да се добијат така што се испишуваат на 10 еднакви ливчиња и се ставаат во затворен сад. Овие ливчиња се извлекуваат едно по едно со враќање и пред секое ново извлекување ливчињата се мешаат. Добиените цифри на овој начин се запишуваат во облик на табела.

Табела 3.2 Табела на случајни броеви

86515	90795	66155	66454	56558	12332	94377	57802
69186	03393	42502	99224	88955	53758	91641	18867
41686	42163	85181	38967	33181	72664	53807	00607
86522	47171	88059	89342	67248	09082	12311	90316
72587	93000	89688	78416	27589	99528	14480	50961
54452	42499	33346	83935	79130	90410	45420	77757
76773	97526	27256	66470	25731	37525	16287	664181
04825	82134	80317	75129	45904	75601	70492	10274
87113	84778	45863	24520	19976	04925	07824	76044
84754	57616	38132	64294	15218	49286	89571	42903

Заради погодноста од користење на табелата за случајни броеви, случајните цифри се групирани во петтоцифрени броеви. Оваа табела се нарекува табела на случајни броеви, иако правилно е да се нарекува табела на случајни цифри. Во табела 10.6 случајните цифри се распоредуваат на случаен начин (независни се и не постои никаква поврзаност во нивниот редослед) и подеднакво често се појавуваат, т.е. имаат униформна густина на распределба. Пребројувањето на застапеност во оваа табела дава распределба на фреквенцијата како во Табела 3.3.

Табела 3.3 Распределба на фреквенцијата на случајни цифри од табелата на случајни броеви

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_n$	33	41	42	33	42	44	40	45	45	35

Претпоставувајќи дека цифрите 0,1,2,...,9 подеднакво се појавуваат во табелата (секоја цифра се очекува  $400 \cdot 0,1 = 40$  пати) со тестот  $\chi$ -квадрат<sup>1</sup> се покажува дека добиените отстапувања се случајни:

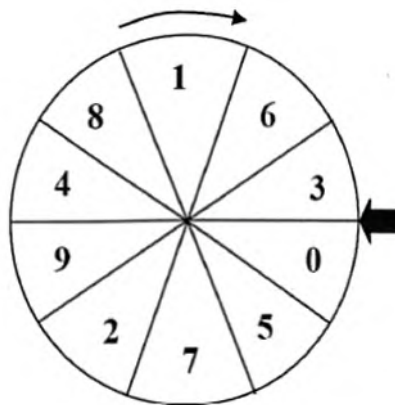
$$\chi^2 = \sum_{n=0}^9 \frac{(f_n - 40)^2}{40} = 8,275 < \chi_{0,05}^{2(9)} = 16,919 \quad (3.7)$$

Со помош на табела 3.2 може да се формираат случајни броеви. Изборот на цифри може да се направи почнувајќи од кое било место во табелата и читајќи ги цифрите од која било насока. Од технички причини, табелата на случајни броеви главно се користи при “рачни” пресметки. На пример, првите 12 двоцифрени броеви се: 86; 51; 59; 07; 95; 66; 15; 56; 64; 54; ~~56~~ (кога некој број ќе се повтори, тогаш се зема следниот) 55 и 81.

На ист начин може да се формираат трицифрени, четирицифрени или повеќецифрени броеви. Случајните броеви со вредности помеѓу 0 и 1 често се користат. Тогаш на пример двоцифрените броеви се множат со 0,01, па се добива низа од случајни децимални броеви: 0,86; 0,59; 0,07; 0,95; 0,66; 0,15; 0,56.

<sup>1</sup>  $\chi$ -квадрат – Статистички тест со кој се проверува хипотезата за совпаѓањето на густините на распределба (резултати од мерења) со некоја однапред претпоставена густина на распределба

Најголемата табела на случајни броеви досега користена, се состои од 1.000.000 цифри. Таа е добиена со употреба на современи техники, отколку споменатата постапка за извлекување ливчиња. За таа цел е формиран специјален рулет којшто се вртел и стопирал со помош на електроника. Подвижниот диск нагло би застанал и цифрата означена со стационираната стрелка би била избрана како на слика 3.2. Вака добиените цифри се собираат во четирицифрени или петтоцифрени броеви и се внесуваат во табелата на случајни броеви. Иако ваквата постапка ги содржи сите својства на случајност, после долг период, почнало да се добиваат цифри, кои според проверката со примена на статистичкиот тест, веќе не би ја имале рамномерната распределба [90, 92].



Слика 3.2 Рулет метода

### 3.5 ГЕНЕРАТОРИ НА СЛУЧАЈНИ БРОЕВИ

Генераторите на случајни броеви се различни технички средства како што се радиоелектронски уреди (диоди, тиратрони, газотрони итн.), кои генерираат (произведуваат) случајни цифри со поголема брзина во однос на случајот со рулет [91, 92]. Како генератори на случајни броеви најчесто се користат радиоелектронските уреди со шумови (електронски лампи). Според тоа, се користи бројач кој го регистрира бројот на шумови  $k$ , кои надминале некое зададено ниво за фиксен временски интервал  $\Delta t$ . Наједноставно би било да се конструира бројач кој би генерирал броеви со вредност 0 (во случај  $k$  да биде парен број) и 1 (во случај  $k$  да биде непарен број). Ако во тој процес веројатностите за добивање 0 и 1 се меѓусебно еднакви, може да се смета дека уредот формира низа случајни бинарни цифри (случајна низа со цифри 0 и 1). Генераторите на случајните броеви обично содржат  $n$  уреди од истакнатиот тип, кои работат независно еден од друг и испраќаат случајни нули и единици во специјална ќелија, така што во секој такт произведуваат случаен број  $Z$ , составен од  $n$  цифри, во бинарен броен систем т.е.:

$$Z = \frac{V_1}{2} + \frac{V_2}{2^2} + \frac{V_3}{2^3} + \dots + \frac{V_n}{2^n} \quad (3.8)$$

каде што секоја од цифрите  $V_1, V_2, \dots, V_n$  претставува реализација на случајната променлива  $V$ , со распределба на веројатноста од 0.5.

Брзината со којашто се генерираат случајните броеви е голема, така што лесно може да се добие потребниот број случајни броеви. Меѓутоа, овој метод на генерирање случајни броеви има свои недостатоци. Прво, тешко е да се проверува квалитетот на таквите броеви, бидејќи е тешко тие да се генерираат со цел нивна контрола. Секако дека

ваквите броеви можат да се меморираат, но во тој случај, практично се користат табели на случајни броеви. Како второ, треба да се има на располагање дополнителни уреди за регуларна проверка на квалитетот на добиените случајни броеви, со помош на специјални тестови што е нееконично. Поради тоа, за поголем дел од проблемите што се решаваат со методата Монте Карло, не е предвидено користење генератори на случајни броеви. Ваквите генератори најчесто се користат кај системите за автоматско управување.

### 3.6 МЕТОДА НА ПСЕВДОСЛУЧАЈНИ БРОЕВИ

Главната причина што не се користат табелите и генераторите на случајни броеви е современата компјутерска техника, со помош на којашто при моделирање на методот Монте Карло, со голема брзина се генерираат неслучајни броеви, кои претставуваат задоволителна замена за случајните броеви [91, 92]. Ваквите броеви се добиваат со помош на некоја нумеричка постапка, формула, псевдослучајни или квазислучајни броеви. Бидејќи квалитетот на случајните броеви не се одредува при постапката на нивното добивање, туку дали задоволуваат некои тестови за случајност, произлегува тоа дека во крајна линија не е важно со која постапка сме дошле до нив. Алгоритмот кој генерално се применува во компјутерското генерирање на случајните броеви, е т.н. линеарен конгруентен метод:

$$N_k \equiv (a \cdot N_0 + b) \bmod m, \quad m = 2^{b-1} \quad (3.9)$$

каде што

$N_k$  - псевдослучаен број

$N_0$  - почетна вредност на секвенцата на псевдослучајните броеви

$a$  - мултипликатор

$b$  - број на битови на целобројната променлива во компјутерот

Најпогодните програмски алатки за Монте Карло симулација, имаат табеларна обработка на податоците, бидејќи обезбедуваат најлесна и најпрегледна постапка, како и можност за лесно манипулирање со излезните податоци. Во денешно време, програмската алатка што преовладува за табеларни пресметки е Microsoft Excel, кој е дел од Microsoft Office. Табелата со податоци може да се претстави и како матрица, па и програмскиот пакет MATLAB, чишто променливи се во форма на матрица, наоѓа широка примена за реализација на Монте Карло методата. За да се користи некоја програма како брза и доверлива симулациска платформа, неопходно е да се исполнуваат одредени барања, односно:

- Способност за претставување на математичките и логичките односи помеѓу променливите во облик на пресметување и доделување вредност, како и алгоритми што опишуваат како да се извршат низа на пресметки,
- Способност за генерирање униформно распределени псевдослучајни броеви и тие да се користат за дефинирање променливи со различна распределба на веројатност,
- Способност за повторување одредена низа на пресметки,
- Голем број функции за извршување математички, статистички, пресметки со бази на податоци, датум/време, финансиски и други пресметки,

- Претставување бази на податоци и пристап до базите на податоци,
- Цртање дијаграми и графикони,
- Приказ и документирање на својства како што се фонтови, бои и геометриски облици, со цел подобра презентација,
- Автоматизација со помош на функции и скрипти.

Програмската алатка Microsoft Excel од програмскиот пакет Microsoft Office содржи генератор на псевдослучајни броеви, кој е доверлив и тој може да се користи во Монте Карло методата. Ваквата функција се повикува кога во делот за формули, за дадената ќелија, се внесе командата  $=RAND()$ . Истата команда, односно *rand*, се користи и во програмскиот пакет MATLAB. Во табелата 3.1 се прикажани функциите на густина на распределба што можат да се формираат со формули и со примена на командата *rand*, во Microsoft Excel и MATLAB.

Табеларната структура за табеларни пресметки овозможува организирање на пресметките и резултатите на природен и интуитивен начин. Извесни ситуации во моделирањето можат да се имплементираат со помош на програма за табеларни пресметки. Секоја низа на пресметки во програмот, може да се смета за модел. Таквите модели обично имаат параметри или променливи чиешто вистински вредности се непознати, па затоа се користат нивни претпоставени вредности. Во некои случаи непознатите параметри се всушност случајни променливи, чиешто вредности не можат да се предвидат, односно таквите модели се стохастички. Стохастички модел е и самата Монте Карло симулација, бидејќи со помош на моделот се пресметуваат повеќе непознати и случајно променливи податоци, кои самиот програм ги симулира.

Табела 3.4 Функции на густина на распределба

Назив на функција	Функција на густина на распределба на веројатност
Униформна	$f(x) = \frac{1}{b-a}$
Нормална	$f(x) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$
Експоненцијална	$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x}$
Логнормална	$f(x) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-\mu)}{\sigma}\right)^2}}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2} \cdot \pi}$
Weibull	$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$

### 3.7 РЕЗУЛТАТИ ОД МЕТОДАТА МОНТЕ КАРЛО

Последен чекор во реализација на методата Монте Карло е анализата на добиените резултати од симулациите т.е. сценаријата. Резултатите можат да се прикажат и анализираат по аналитички и графички пат. Со цел потполна анализа на резултатите, потребно е да се прикажат податоците за средна вредност, медијана, стандардна

девијација, интервал, стандардна грешка, но и останатите статистички податоци, се со цел квалитетна анализа на распределбата на веројатност. За приказ на резултатите генерално се користи графички метод, а се состои од креирање на хистограм.

Средната вредност и медијаната служат за статистички опис на централната тежина т.е. тенденцијата или „локацијата“ на распределба [90-93]. **Средната вредност** претставува просечна вредност од сите сценарија, а се пресметува во согласност со изразот:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n_{scen}} \quad (3.10)$$

каде што

$x_i$  - вредност добиена во  $i$ -тото сценарио

$n_{scen}$  – број на сценарија

**Медијана** е број што ја раздвојува горната половина на добиените резултати од долната половина на резултатите. На пример, ако резултатите се подредат од најмали до најголеми, медијаната претставува нивна „средина“ односно 50-ти процент, означувајќи дека 50% од резултатите на сценаријата се помали од медијаната. Со други зборови, доколку еднаков број точки што ги прикажуваат вредностите од сценаријата, тогаш медијаната претставува средина помеѓу две средни точки. Екстремните вредности имаат големо влијание врз средната вредност, но медијаната зависи единствено од средната точка. Ваквото својство е многу корисно за приказ на средината т.е. центарот на кривите на распределба на веројатност. Ако распределбата е симетрична, како што е на пример нормалната т.е. Gauss-овата распределба, тогаш средната вредност и медијаната би биле идентични.

**Мод** е вредност којашто има најголема зачестеност на појава (најчеста вредност). **Варијанса, стандардна девијација, интервал и квантил**, претставуваат параметри што го опишуваат распростирањето на податоците, т.е. претставуваат мерки за отстапувањето.

**Варијанса (дисперзија)** е мерка за расипување на низата резултати, добиена од симулација на сценаријата, а се пресметува според изразот:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n_{scen}} \quad (3.11)$$

**Стандардна девијација** е параметар кој ја покажува просечната оддалеченост на добиените вредности од средната вредност. Ако добиените податоци се блиску до средната вредност, стандардната девијација ќе биде мала, односно близу нула. Спротивно на ова, ако точките што ги прикажуваат резултатите од сценаријата многу се разликуваат од средната вредност, тогаш стандардната девијација ќе биде голема. На крајот, ако добиените вредности се еднакви, тогаш стандардната девијација ќе биде еднаква на нула. Што се однесува до формулацијата, стандардната девијација се дефинира како квадратен корен од варијансата, па таа се пресметува според изразот:

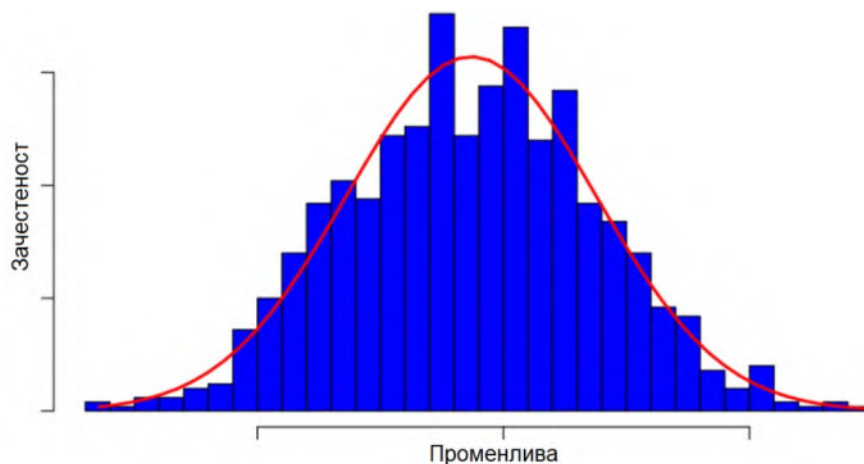
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n_{scen}}} \quad (3.12)$$

**Стандардна грешка** претставува однос помеѓу стандардната девијација и квадратниот корен од бројот на сценарија, односно:

$$\nu = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.13)$$

**Интервал** е број кој се добива со одземање на минималната од максималната вредност. Од поопшта смисла, тој може да се дефинира и како должина на најмалиот интервал што ги содржи сите податоци (интервал на варијација). **Квантил на распределба** на вредностите  $x_p$ , е број кој дава приказ дека процент  $p$  од низата вредности, е помал или еднаков на  $x_p$ . На пример, квантил 25 односно „долен“ квартал, е променлива на величината  $x_p$ , кој истакнува дека 25% од вредностите се под таа вредност. Слично на ова, квантил 75 односно „горен“ квартал, истакнува дека 75% од вредностите се под таа вредност. Квантил 50 е всушност самата медијана. **Максимална и минимална вредност** се екстремни вредности добиени од резултатите на сценаријата.

**Хистограм** претставува графички приказ на табела, кој покажува колкав е опсегот на сценарија, чишто вредности од симулацијата припаѓаат на секоја од неколку можни категории. Хистограмот овозможува брзо да се воочи типот на распределба на вредностите од големиот број сценарија. Една од основните форми на хистограмот се добива со раздвојување на целокупното подрачје со податоци, во делови со еднаква големина, кои се нарекуваат **класи**. Потоа за секој дел се пресметуваат бројот на сценарија, чишто добиени резултати припаѓаат на тој дел. На вертикалната оска на графикот т.е. ординатата е зачестеноста, а на хоризонталната оска т.е. апсцисата е соодветната променлива, како што е прикажано на Слика 3.1.



Слика 3.3 Хистограм (за нормална распределба)

Во согласност со слика 3.1, у оската ја претставува зачестеноста (зачестеноста на вредноста  $i$  е бројот  $n_i$  и покажува во колку сценарија се добила таа), а  $x$  оската претставува посебна категорија на податоци што е предмет на анализа. Бар линиите ги означуваат поединечните класи на вредностите од сценаријата, т.е. нивната зачестеност во однос на вкупниот број сценарија. Кривата (во овој случај нормална распределба) претставува друг начин на прикажување на хистограмот.





# **ПРЕСМЕТКА НА ТЕКОВИТЕ НА МОЌНОСТ**

---

---

**Поглавје**

**4**

## 4 ПРЕСМЕТКА НА ТЕКОВИТЕ НА МОЌНОСТ

### 4.1 МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ НА МРЕЖАТА

Моделот во општа смисла може да се дефинира како план или опис на реален предмет, појава, состојба или концепт, односно апстрактен приказ на реален систем, кој би служел за понатамошни истражувања. Математичките модели претставуваат систем математички изрази (равенства и/или неравенства) што го опишуваат предметот на моделирање [94].

Модел на мрежата се добива на тој начин што секој елемент на системот ќе се претстави со својот еквивалентен модел, како и со меѓусебно поврзување на поединечните модели на елементите, на начин на којшто тие се поврзани во реална мрежа. Обично анализата на теките на моќност се однесува на системи што се наоѓаат во стационарен режим, при што се претпоставува дека сите елементи на системот се симетрични, па затоа при анализата се користи еднофазен модел. При случај на несиметрична изведба, елементите и потрошувачите треба да се прикажат со трифазен модел. Предноста на работата на моделот во однос на реалниот систем е тоа што очекуваните резултати се анализираат на моделот, притоа без да се модифицира реалниот систем.

За опишување на електроенергетскиот систем, математичкиот модел во нормален погон со  $n$  јазли се темели на методата на јазлови потенцијали, изразена со помош на матрицата на админтанси на јазлите  $Y$ , или матрицата на импеданси на јазлите  $Z$ .

#### 4.1.1 Матрица на админтанси на јазлите

Бидејќи решението на методата којашто се базира на јазли е базирано на првиот Кирхофов закон за струите, импедансите се претвораат во админтанси на следниот начин [95, 96]:

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}}. \quad (4.1)$$

Во ЕЕС, секој јазол е поврзан само со неколку соседни јазли. Дијагоналниот елемент на секој јазол е сума од админтансите на јазлите поврзани со тој јазол, т.е.:

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^n y_{ij}, \quad j \neq i. \quad (4.2)$$

Вондијагоналниот елемент е еднаков на негативната вредност од админтансата помеѓу јазлите  $i$  и  $j$ , односно:

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}. \quad (4.3)$$

Применувајќи ги горните релации за систем од  $n$  собирници, равенката на напоните на јазлите во матричен облик е:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

или во скратен облик

$$I = Y \cdot U \quad (4.5)$$

каде што

$I$  - вектор на инјектираните струи во јазлите

$U$  - вектор со напони на јазлите (мерен во однос на референтниот јазол)

$Y$  - матрица на админтанси на јазлите

Што се однесува до векторот на инјектираните струи, струјата има позитивна насока кога влегува во јазолот т.е. собирницата, а негативна насока ако излегува од јазолот.

Кога е позната струјата на инјектирање на секој јазол, од релацијата (4.5) можат да бидат одредени и напоните за  $n$  собирници, односно:

$$U = Y^{-1} \cdot I = Z \cdot I \quad (4.6)$$

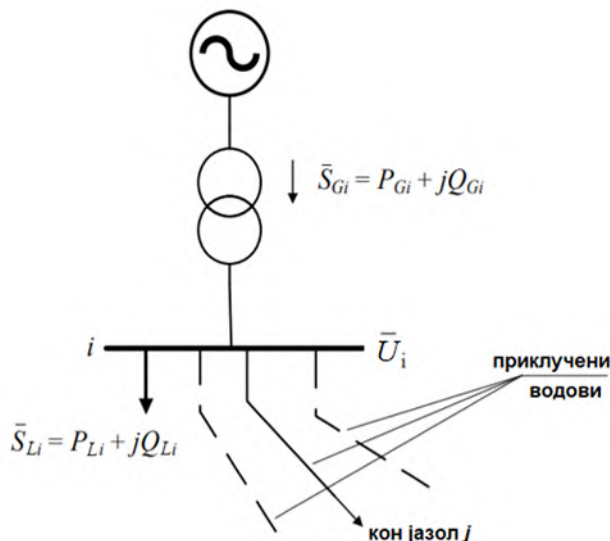
каде што  $Z = Y^{-1}$  е матрица на импеданси на јазлите.

## 4.2 РАВЕНКИ НА ТЕКОВИТЕ НА МОЌНОСТ И ТИПОВИ НА ЈАЗЛИ ВО СИСТЕМОТ

### 4.2.1 Равенки на тековите на моќност

За јазол  $i$  се дефинира нето моќност  $\bar{S}_i$  како разлика од привидната моќност којашто електраната ја дава во мрежа (јазол)  $\bar{S}_{Gi}$  и привидната моќност којашто потрошувачот ја зема од мрежа (јазли)  $\bar{S}_{Li}$ . Потребно е да се напомене дека моќноста што влегува во јазолот (моќност на генератор) има предзнак „+“, а моќноста што излегува од јазолот (моќност на оптоварување) е со предзнак „-“.

На слика 4.1 е прикажан јазол  $i$  со моќноста на електраната  $\bar{S}_{Gi}$  и моќноста на оптоварување  $\bar{S}_{Li}$ .

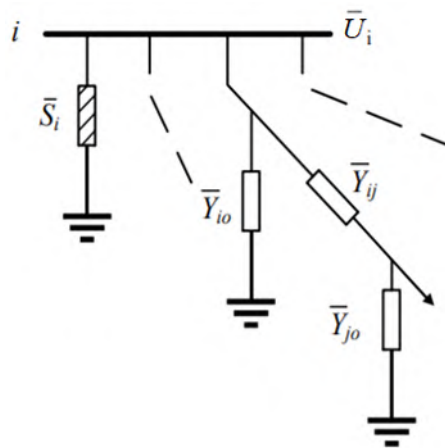


Слика 4.1 Поедноставен приказ на јазол  $i$  со генератор, потрошувачи и преносни водови

Нето привидната моќност на јазол  $i$  изнесува [96]:

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{S}_{Gi} - \bar{S}_{Li} = P_{Gi} - P_{Li} + j(Q_{Gi} - Q_{Li}) \quad (4.7)$$

На сликата е прикажан јазол  $i$  со симбол за нето моќноста на јазолот и преносните водови. Нето моќноста на јазолот  $\bar{S}_i$  се дефинира како нето моќност инјектирана во јазолот  $i$  по пат на еквивалентниот т.н. “собирички извор”.



Слика 4.2 Поедноставен приказ на јазол  $i$  со симбол за нето моќност во јазолот и преносните водови [4]

Привидната моќност  $\bar{S}_i$  може да се дефинира со релацијата:

$$\bar{S}_i = \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i^* \quad (4.8)$$

каде:

$\bar{U}_i$  - комплексна вредност на напонот на јазолот  $i$

$\bar{I}_i^*$  - конјугирано комплексна вредност на струјата на јазолот  $i$

Во согласност со изразите (4.4) и (4.5) може да се напише:

$$\bar{I}_i = \bar{Y}_{i1}\bar{U}_1 + \bar{Y}_{i2}\bar{U}_2 + \dots + \bar{Y}_{ii}\bar{U}_i + \dots + \bar{Y}_{in}\bar{U}_n = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}\bar{U}_j \quad (4.9)$$

Конјугирано комплексната вредност на струјата  $\bar{I}_i$ :

$$\bar{I}_i^* = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^* \cdot \bar{U}_j^* \quad (4.10)$$

Од равенките (4.8) и (4.9) се добива изразот за нето моќноста на јазолот  $i$ :

$$\bar{S}_i = \bar{U}_i \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^* \bar{U}_j^* \quad (4.11)$$

Комплексната вредност на напонот на јазолот  $\bar{U}_i$  може да се прикаже во поларен облик:

$$\bar{U}_i = U_i \angle \theta_i = |U_i| (\cos \theta_i + j \sin \theta_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.12)$$

каде:  $U_i$  - модул на напонот, а  $\theta_i$  - фазен агол на напонот

Доколку за референтниот т.е. балансниот јазол (анг. slack bus) е познат напонот, а за фазниот агол обично се зема вредност нула, тогаш важи релацијата:

$$\bar{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ \quad (4.13)$$

Аналогно, комплексните елементи  $\bar{Y}_{ij}$  на матрицата на адмитанци на јазлите  $\bar{Y}$  се прикажуваат како:

$$\bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \delta_{ij}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.14)$$

Ако се земаат предвид равенките погоре, тогаш за вредност на нето моќноста на јазолот  $i$  се добива изразот:

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{U}_i \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^* \bar{U}_j^* = \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} e^{j(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij})}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.15)$$

Со раздвојување на реалниот и имагинарниот дел во релацијата (4.15) се добиваат равенките за инјектираната активна и реактивна моќност на јазолот  $i$ :

Активна моќност на јазол  $i$ :

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.16)$$

Реактивна моќност на јазол  $i$ :

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} = \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.17)$$

## 4.2.2 Класификација на јазлите

Јазол претставува место или точка во електричната мрежа каде што се спојуваат повеќе гранки. Секој јазол “ $i$ ” се дефинира со помош на шест величини т.е. променливи, а тоа се [94, 96]:

- $U_i$  - модул на напонот на јазолот  $i$
- $\theta_i$  - фазен агол на напонот на јазолот  $i$
- $P_{Gi}$  - активна моќност на генераторот на јазолот  $i$
- $P_{Li}$  - активна моќност на потрошувачот (оптоварувањето) на јазолот  $i$
- $Q_{Gi}$  - реактивна моќност на генераторот на јазолот  $i$
- $Q_{Li}$  - реактивна моќност на потрошувачот (оптоварувањето) на јазолот  $i$

Јазлите во мрежата се разликуваат според однапред дадените величини и оние непознатите што треба да се одредат преку решавање на равенките за текови на моќност на јазлите. Во табела 4.2 е прикажана класификацијата на јазлите. Секој јазол има две величини кои се познати, а во зависност од типот се непознати.

Табела 4.1 Класификација на јазлите

Тип на јазол	Познати величини	Непознати величини
Балансен (slack) јазол	$U_1, \theta_1$	$P_{G1}, Q_{G1}$
Потрошувачки јазол (PQ јазол)	$P_{Li}, Q_{Li}$	$U_i, \theta_i$
Генераторски јазол (PV јазол)	$P_{Gi}, U_i$	$Q_{Gi}, \theta_i$

- **Балансен јазол (анг. *Slack Bus*)** соодветствува на собирниците на електрани со голема моќност, или кај собирниците коишто се надоврзуваат на крута мрежа. Овој јазол ја покрива разликата помеѓу планираното оптоварување и произведената моќност што настанала поради загубите во мрежа. Балансниот јазол служи за одредување на сите останати напони во мрежата, па обично за аголот на напон  $\theta_i$  се зема вредност нула, а напонот  $U_1$  е однапред даден, при што неговата вредност одговара на номиналниот напон или се зема  $U_1 = 1,0$  p.u (анг. *per unit*). Индексот на балансниот јазол е секогаш 1. Бидејќи се познати вредностите за модулот и фазниот агол на напонот, непознатите што треба да се одредат се активната и реактивната моќност на генераторот  $P_{Gi}$  и  $Q_{Gi}$ .
- **Потрошувачки јазол (анг. *Load Bus*)** претставува онаа собирница од системот на којашто е приклучена потрошувачката, па се дадени активната  $P_{Li}$  и реактивната  $Q_{Li}$  моќност на оптоварувањето. Доколку на ваквите јазли не се приклучени генератори т.е.  $P_{Gi}$  и  $Q_{Gi} = 0$ , непознатите величини коишто треба да се одредат се модулот на напонот  $U_i$  и фазниот агол на напонот  $\theta_i$ . Познати под името PQ јазли (анг. *Load Bus*), тие се еден од најзастапените типови помеѓу јазлите што се наоѓаат во електроенергетскиот систем. Доколку во некој јазол нема ниту генератори

ниту потрошувачи, тогаш тој јазол може да се третира како потрошувач кај кој важи  $P_{Li} = Q_{Li} = 0$  .[8]

- **Генераторски јазол**, исто така познат и како PV јазол или напонски-контролиран јазол, е тип на јазол на кој се поврзани генераторите во електроенергетскиот систем. [9] Кај овој јазол познати величини се активната моќност на генераторот  $P_{Gi}$  и модулот на напонот  $U_i$ , а фазниот агол на напонот  $\theta_i$  и реактивната моќност на генераторот  $Q_{Gi}$  се сметаат за непознати променливи.

За сигурна работа на системот, мора да постои ограничување на произведената активна моќност на генераторот во секој момент. Затоа мора да биде исполнет следниот услов:

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} \quad (4.18)$$

Исто така треба да постои ограничување на произведената реактивна моќност  $Q_{Gi}$ . Реактивната моќност на генераторот се пресметува на тој начин што се поставува критериум така што моќноста да остане во интервалот на реалните минимални и максимални граници. Доколку оваа величина е непозната, потребно е по секоја итерација во пресметката, да се проверува условот:

$$Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} \quad (4.19)$$

Во случај да не биде исполнет условот (4.19), вредноста на реактивната моќност на генераторот треба да се постави на минимална вредност  $Q_{Gi,\min}$ , односно на максимална вредност  $Q_{Gi,\max}$ . Тогаш набљудуваниот јазол станува потрошувачки јазол, а во случај условот (4.19) да биде исполнет во текот на пресметките, тогаш јазолот се третира како генераторски.

### 4.3 МЕТОД НА NEWTON-RAPHSON ЗА РЕШАВАЊЕ НА РАВЕНКИТЕ НА ТЕКОВИТЕ НА МОЌНОСТ

Равенките на тековите на моќност се нелинеарни равенки, кои бараат користење на итеративни методи за добивање на решението. Најпознатиот метод што се користи за итеративно решавање на нелинеарни равенки е методот на Newton-Raphson. Методот на Newton-Raphson, најпрво ќе биде прикажан за еднодимензионален проблем, односно за равенка со една променлива (кој во наредните поглавја ќе биде применет за решавање на релацијата (2.34) моделирана со *maximum likelihood method*), а следствено ќе биде проширен за повеќедимензионален проблем, односно за решавање на  $n$  равенки со  $n$  променливи (кој во ова поглавје ќе биде применет за решавање на тековите на моќност во ЕЕС).

#### 4.3.1 Еднодимензионален проблем

Нека решението на равенките со една променлива е дадено со [96, 97]:

$$f(x) = c \quad (4.20)$$

Ако  $x^{(0)}$  е почетна проценка за решение, и ако  $\Delta x^{(0)}$  е мало отстапување од точното решение, тогаш

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = c \quad (4.21)$$

Со решавање на левата страна на претходната равенка во Тејлоровиот ред во близина на  $x^{(0)}$ , се добива

$$f(x^{(0)}) + \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)} + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2f}{dx^2}\right)^{(0)} (\Delta x^{(0)})^2 + \dots = c \quad (4.22)$$

Ако се претпостави дека грешката  $\Delta x^{(0)}$  е многу мала, изводите од повисок степен можат да бидат занемарени, па следи

$$\Delta c^{(0)} \cong \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)} \quad (4.23)$$

каде

$$\Delta c^{(0)} = c - f(x^{(0)}) \quad (4.24)$$

Со додавање на  $\Delta x^{(0)}$ , почетната проценка резултира во друга апроксимација со

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \frac{\Delta c^{(0)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)}} \quad (4.25)$$

Итеративната употреба на оваа постапка го дава алгоритмот на Newton-Raphson

$$\Delta c^{(k)} = c - f(x^{(k)}) \quad (4.26)$$

$$\Delta x^{(k)} = \frac{\Delta c^{(k)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)}} \quad (4.27)$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad (4.28)$$

### 4.3.2 Повеќедимензионален проблем

Изразот (4.25) може да се поедностави како [96, 97]

$$\Delta c^{(k)} = j^{(k)} \Delta x^{(k)} \quad (4.29)$$

каде

$$j^{(k)} = \left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)} \quad (4.30)$$

Релацијата (4.16) демонстрира дека нелинеарната равенка  $f(x) - c = 0$ , е апроксимирана со тангентата на кривата  $x^{(k)}$ .

Нека се разгледува системот од  $n$  равенки со  $n$  променливи



$$\begin{aligned}
 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= c_1 \\
 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= c_2 \\
 &\dots\dots\dots \\
 f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= c_n
 \end{aligned}
 \tag{4.31}$$

Со решавање на секоја равенка (4.18) по една од променливите, равенките се преуредуваат и се запишуваат како

$$\begin{aligned}
 x_1 &= c_1 + g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\
 x_2 &= c_2 + g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\
 &\dots\dots\dots \\
 x_n &= c_n + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n)
 \end{aligned}
 \tag{4.32}$$

Со проширување на левата страна од равенките (4.18) во Тејлоров ред околу почетните проценки и со занемарување на сите изводи од повисок ред, се доаѓа до изразот:

$$\begin{aligned}
 (f_1)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} &= c_1 \\
 (f_2)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} &= c_2 \\
 &\vdots \\
 (f_n)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} &= c_n
 \end{aligned}
 \tag{4.33}$$

или во матричен облик

$$\begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^{(0)} \\ c_2 - (f_2)^{(0)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix}
 \tag{4.34}$$

Во скратена форма, претходната релација може да се запише како

$$\Delta C^{(k)} = J^{(k)} \Delta X^{(k)}
 \tag{4.35}$$

или

$$\Delta X^{(k)} = [J^{(k)}]^{-1} \Delta C^{(k)}
 \tag{4.36}$$

па алгоритмот Newton-Raphson за случај со  $n$  променливи го добива следниот облик

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k)} \quad (4.37)$$

каде

$$\Delta X^{(k)} = \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(k)} \\ \Delta x_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

$$\Delta C^{(k)} = \begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^{(k)} \\ c_2 - (f_2)^{(k)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(k)} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

$$J^{(k)} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Матрицата  $J^{(k)}$  се нарекува матрица *Jacobian*. Елементите на оваа матрица се парцијални изводи за  $X^{(k)}$ . Претпоставено е дека  $J^{(k)}$  има инверзна матрица за секоја итерација. Методот на Newton-Raphson, применет на систем од нелинеарни равенки, го сведува проблемот на решавање на систем од линеарни равенки за одредување на вредности што ја подобруваат точноста на проценката.

### 4.3.3 Примена на методот на Newton-Raphson во правоаголни координати за решавање на равенките на тековите на моќност

На почетокот се претпоставува дека сите јазли во системот освен балансниот се PQ јазли. Моќноста во јазолот  $i$  е дадена со изразот [96, 97]:

$$P_i - jQ_i = \bar{U}_i^* \bar{I}_i \quad (4.41)$$

Доколку во претходната релација се изврши замена за  $\bar{I}_i$  според равенките за напоните на јазлите се добива следниот израз:

$$\bar{I}_i = \bar{Y}_{i1} \bar{U}_1 + \bar{Y}_{i2} \bar{U}_2 + \dots + \bar{Y}_{in} \bar{U}_n = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad (4.42)$$

па се добива

$$P_i - jQ_i = \bar{U}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad (4.43)$$

Доколку напоните  $\bar{U}_i$  и  $\bar{U}_j$  се изразат со помош на правоаголни координати следи

$$\begin{aligned} \bar{U}_i &= e_i + jf_i \\ \bar{U}_j &= e_j + jf_j \end{aligned} \quad (4.44)$$

како и

$$\bar{Y}_{ij} = G_{ij} + B_{ij} \quad (4.45)$$

Со замена на (4.44) и (4.45) во (4.43) следи

$$P_i - jQ_i = (e_i - jf_i) \sum_{j=1}^n (G_{ij} + jB_{ij})(e_j + jf_j) \quad (4.46)$$

Со раздвојување на реалниот и имагинарниот дел од (4.46), се добиваат изразите за активната и реактивната моќност на кој било јазол  $i$ , т.е.:

$$P_i = \sum_{j=1}^n \left[ e_i (e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) + f_i (f_j G_{ij} + e_j B_{ij}) \right] \quad (4.47)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \left[ f_i (e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) - e_i (f_j G_{ij} + e_j B_{ij}) \right] \quad (4.48)$$

Со издвојување на  $i$ -тиот јазол изразите (4.47) и (4.48) го добиваат обликот:

$$\begin{aligned} P_i &= e_i (e_i G_{ii} - f_i B_{ii}) + f_i (f_i G_{ii} + e_i B_{ii}) + \\ &\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left[ e_i (e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) + f_i (f_j G_{ij} + e_j B_{ij}) \right] \end{aligned} \quad (4.49)$$

$$\begin{aligned} Q_i &= f_i (e_i G_{ii} - f_i B_{ii}) - e_i (f_i G_{ii} + e_i B_{ii}) + \\ &\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left[ f_i (e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) - e_i (f_j G_{ij} + e_j B_{ij}) \right] \end{aligned} \quad (4.50)$$

Горните формулации резултираат во систем од нелинеарни алгебарски равенки, односно по две равенки за секој јазол (една за активната моќност  $P_i$  а другата за реактивната моќност  $Q_i$ ). Според тоа, доколку се из земе балансниот јазол, кај кој се специфицирани  $U$  и  $\theta$  во текот на целокупната пресметка, следи дека вкупниот број на равенки во системот ќе биде  $2(n-1)$ .

Со помош на методот на Newton-Raphson горните нелинеарни равенки за моќностите се трансформираат во систем линеарни алгебарски равенки кои ги означуваат промените во моќностите (т.е. грешките во моќностите) со промените во реалните и имагинарните компоненти на напоните на јазлите, преку системската матрица Jacobian. Нормално, почетните вредности треба да бидат блиску до крајните решенија, бидејќи ќе настанат големи грешки во отстапувањето.

Од равенките (4.47) и (4.48) се добива

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \vdots \\ \frac{\Delta P_{n-1}}{\Delta Q_1} \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_1} & \dots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \vdots \\ \Delta e_{n-1} \\ \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta f_{n-1} \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

Овде  $n$ -тиот јазол е балансен јазол. Системот (4.51) може да се изрази преку блок-матрица како

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

каде  $\mathbf{J}_1$ ,  $\mathbf{J}_2$ ,  $\mathbf{J}_3$ , и  $\mathbf{J}_4$  се блок-матрици на Јакобиан чиешто елементи се пресметуваат како парцијални изводи на равенките (4.49) и (4.50).

Вондијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_1$  се:

$$\frac{\partial P_i}{\partial e_j} = e_i G_{ij} + f_i B_{ij}, \quad i \neq j \quad (4.53)$$

Дијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_1$  се:

$$\frac{\partial P_i}{\partial e_i} = 2e_i G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (e_j G_{ij} - f_i B_{ij}) \quad (4.54)$$

Вондијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_2$  се:

$$\frac{\partial P_i}{\partial f_j} = -e_i B_{ij} + f_i G_{ij}, \quad i \neq j \quad (4.55)$$

Дијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_2$  се:

$$\frac{\partial P_i}{\partial f_i} = 2f_i G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (f_j G_{ij} + e_i B_{ij}) \quad (4.56)$$

Вондијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_3$  се:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial e_j} = -e_i B_{ij} + f_i G_{ij}, \quad i \neq j \quad (4.57)$$

Дијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_3$  се:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial e_i} = -2e_i B_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (f_j G_{ij} + e_i B_{ij}) \quad (4.58)$$

Вондијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_4$  се:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial f_i} = -2e_i G_{ii} - f_i B_{ij}, \quad i \neq j \quad (4.59)$$

Дијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_4$  се:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial f_i} = -2f_i B_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (e_j G_{ij} - f_i B_{ij}) \quad (4.60)$$

Алгоритмот за решавање на тековите на моќност со методот на Newton-Raphson се состои од следните чекори:

1. Се претпоставуваат почетните вредности на компонентите  $e$  и  $f$  напонот на генераторските и потрошувачките јазли, со исклучок на балансниот, по модул и фаза. Обично за сите јазли се започнува со исти единечни вредности (*flat voltage start*)
2. Замена на претпоставените вредности на напоните на јазлите во изразите (4.49) и (4.50) и пресметка на ативната и реактивната моќност  $P_i$  и  $Q_i$  за сите  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$  јазли, освен за балансниот јазол.
3. Бидејќи  $P_i$  и  $Q_i$  за PQ јазлите се однапред дадени, грешката за моќноста во  $k$ -тата итерација ќе изнесува:

$$\begin{aligned} \Delta P_i^{(k)} &= P_{i(\text{зададено})} - P_i^{(k)} \\ \Delta Q_i^{(k)} &= Q_{i(\text{зададено})} - Q_i^{(k)} \end{aligned} \quad (4.61)$$

Овде  $P_i$  и  $Q_i$  се пресметуваат според последните вредности на напоните на јазлите во  $k$ -тата итерација.

4. Пресметка на елементите на матрицата Јакобјан  $\mathbf{J}_1$ ,  $\mathbf{J}_2$ ,  $\mathbf{J}_3$ , и  $\mathbf{J}_4$  со последните вредности за напоните и моќностите од (4.49) и (4.50).
5. Решавање на системот линеарни равенки (4.51) со некој од итеративните методи, или на пример со Гаусовиот метод на елиминација за да се одредат напонските корекции т.е.  $\Delta e_i$  и  $\Delta f_i$  за секој јазол  $i$ .
6. Вредностите на напонските корекции се користат за одредување на компонентите на напоните на јазлите во  $(k+1)$  итерацијата т.е.:

$$\begin{aligned} e_i^{(k+1)} &= e_i^{(k)} + \Delta e_i^{(k)} \\ f_i^{(k+1)} &= f_i^{(k)} + \Delta f_i^{(k)} \end{aligned} \quad (4.62)$$

7. Примена на новата проценка за компонентите на напонот од (4.53) во равенките за моќност (4.49) и (4.50) за пресметка на грешката во моќностите

и на тој начин целиот алгоритам се повторува од чекорот 3 до 7. Процесот продолжува сè додека грешката во моќноста не го задоволува критериумот на точност  $\varepsilon$  :

$$|\Delta P_i| < \varepsilon; |\Delta Q_i| < \varepsilon \quad (4.63)$$

Методот на Newton-Raphson конвергира побрзо споредбено со методот на Gauss-Seidel поради квадратната конвергенција. Кај модифицираниот метод на Newton-Raphson, потребни се 5-6 итерации за да се дојде до решението, при што потребното време за извршување на една итерација е речиси седум пати поголемо во однос на методот на Gauss-Seidel [96, 97].

#### 4.3.4 Примена на методот на Newton-Raphson во поларни координатиза решавање на равенките на тековите на моќност

Проблемот за анализа на тековите на моќност со помош на методот на Newton-Raphson може да се формулира во поларни координати [96, 97]. Нека важи

$$\begin{aligned} \bar{U}_i &= U_i e^{j\theta_i} \\ \bar{U}_i^* &= U_i e^{-j\theta_i} \\ \bar{U}_j &= U_j e^{j\theta_j} \\ \bar{Y}_{ij} &= Y_{ij} e^{j\delta_{ij}} \\ \bar{Y}_{ij}^* &= Y_{ij} e^{-j\delta_{ij}} \end{aligned} \quad (4.64)$$

каде  $\theta$  е фазен агол на напонот, а  $\delta$  е фазен агол на адмитансата.

Со замена на (4.64) во (4.43) се добива

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} e^{-j(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij})} \quad (4.65)$$

Со развојување се добива

$$\begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \\ &= U_i^2 Y_{ii} \cos \delta_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \end{aligned} \quad (4.66)$$

$$\begin{aligned} Q_i &= \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \\ &= -U_i^2 Y_{ii} \sin \delta_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \end{aligned} \quad (4.67)$$

за  $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$ , при што  $n$ -тиот јазол е балансен.

Системот од линеарни равенки во поларни координати има облик:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

каде  $\mathbf{J}_1$ ,  $\mathbf{J}_2$ ,  $\mathbf{J}_3$ , и  $\mathbf{J}_4$  се блок-матрици Јакобиан чиешто елементи се парцијалните изводи на равенките (4.66) и (4.67).

Вондијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_1$  се:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = U_i U_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}), \quad i \neq j \quad (4.69)$$

Дијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_1$  се:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \quad (4.70)$$

Вондијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_2$  се:

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}), \quad i \neq j \quad (4.71)$$

Дијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_2$  се:

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2U_i Y_{ii} \cos \delta_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \quad (4.72)$$

Вондијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_3$  се:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -U_i U_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}), \quad i \neq j \quad (4.73)$$

Дијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_3$  се:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \quad (4.74)$$

Вондијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_4$  се:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}), \quad i \neq j \quad (4.75)$$

Дијагоналните елементи од  $\mathbf{J}_4$  се:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2U_i Y_{ii} \sin \delta_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \quad (4.76)$$

Елементите на блок-матриците на матрицата Јакобиан се пресметуваат со последните проценети вредности на напоните и моќностите. Итеративната процедура е идентична со процедурата за правоаголни координати. Со формулацијата на методот на

Newton-Raphson во поларни координати се олеснува нумеричката постапка, а од друга страна потребна е и помала меморија за извршување на нумеричката пресметка.

Бидејќи активната моќност  $\mathbf{P}$  е малку осетлива на промената на модулот на напонот  $\Delta|\mathbf{V}|$ , а реактивната моќност  $\mathbf{Q}$  на промена на фазниот агол  $\Delta\theta$ , соодветните парцијални изводи, т.е. елементите на вондијагоналниот блок на матрицата Јакобјан  $\mathbf{J}_2$  и  $\mathbf{J}_3$  стануваат еднакви на нула. Тогаш равенката (4.68) го добива следниот облик:

$$\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P} \\ \Delta\mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta|\mathbf{V}| \end{bmatrix} \quad (4.77)$$

Добиениот облик претставува *Приближен Њутн-Рафсонов метод* со кој се забрзуваат пресметките. Слично и за правоаголни координати, приближниот метод на Newton-Raphson се добива кога во субматриците на Јакобиан  $\mathbf{J}_1$ ,  $\mathbf{J}_2$ ,  $\mathbf{J}_3$  и  $\mathbf{J}_4$  се занемарат вондијагоналните елементи. Ова резултира во следниот облик на равенки:

$$\Delta P_i = \frac{\partial P_i}{\partial e_i} \Delta e_i + \frac{\partial P_i}{\partial f_i} \Delta f_i \quad (4.78)$$

$$\Delta Q_i = \frac{\partial Q_i}{\partial e_i} \Delta e_i + \frac{\partial Q_i}{\partial f_i} \Delta f_i \quad (4.79)$$

каде за парцијалните изводи  $\frac{\partial P_i}{\partial e_i}$ ,  $\frac{\partial P_i}{\partial f_i}$ ,  $\frac{\partial Q_i}{\partial e_i}$  и  $\frac{\partial Q_i}{\partial f_i}$  се користат веќе изведените релации (4.54), (4.56), (4.58) и (4.60), респективно [96, 97].

### 4.3.5 PV јазол во методот на Newton-Raphson

За да се опфатат и PV јазлите, неопходно е претходниот модел и итеративната постапка да се надополнат со вклучување на релацијата за дадените величини  $P$  и  $U$ .

Равенките за напонско-контролиран PV јазолот во методот на Newton-Raphson се следните [96, 97]:

$$P_i = \sum_{j=1}^n \left[ e_i (e_j G_{ij} - f_j B_{ij}) + f_i (f_j G_{ij} + e_j B_{ij}) \right] \quad (4.80)$$

и

$$U_i^2 = e_i^2 + f_i^2 \quad (4.81)$$

каде што равенката (4.81) ја заменува равенката за реактивната моќност  $Q_i$ . Матричната равенка што ги поврзува промените на моќност  $\Delta\mathbf{P}$ ,  $\Delta\mathbf{Q}$  и квадратот на модулот на напонот  $\Delta|\mathbf{V}|^2$  со промената на реалните и имагинарните компоненти на модулот на напон е:

$$\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P} \\ \Delta\mathbf{Q} \\ \Delta|\mathbf{V}|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \\ \mathbf{J}_5 & \mathbf{J}_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{e} \\ \Delta\mathbf{f} \end{bmatrix} \quad (4.82)$$



Елементите на блок-матриците  $\mathbf{J}_1$ ,  $\mathbf{J}_2$ ,  $\mathbf{J}_3$  и  $\mathbf{J}_4$  се одредуваат со помош на релациите (4.53) до (4.60) а додека елементите на блок-матриците  $\mathbf{J}_5$  и  $\mathbf{J}_6$  се изведуваат од (4.81) и изнесуваат:

Вондијагонални елементи на  $\mathbf{J}_5$ :

$$\frac{\partial U_i^2}{\partial e_j} = 0, j \neq i \quad (4.83)$$

Дијагонални елементи на  $\mathbf{J}_5$ :

$$\frac{\partial U_i^2}{\partial e_i} = 2e_i \quad (4.84)$$

Вондијагонални елементи на  $\mathbf{J}_6$ :

$$\frac{\partial U_i^2}{\partial f_j} = 0, j \neq i \quad (4.85)$$

Дијагонални елементи на  $\mathbf{J}_6$ :

$$\frac{\partial U_i^2}{\partial f_i} = 2f_i \quad (4.86)$$

Промената на квадратот на модулот на напонот на јазолот  $i$  е:

$$\Delta U_i^{2(k)} = \left\{ U_i^2(\text{зададено}) - U_i^{2(k)} \right\} \quad (4.87)$$

Доколку реактивната моќност на генераторот  $Q_i$  не е во можност да ја одржи посакуваната вредност на напонот на јазолот, тогаш моќноста  $Q_i$  се фиксира на гранична вредност  $Q_{i\max}$ , а понатаму ваквиот јазол се третира како PQ јазол.

После одредувањето на напонот на јазлите, се врши пресметка на тековите на моќност и загубите низ водовите.

Во оваа докторска дисертација пресметката на тековите на моќност, а со тоа и моделирањето на алгоритмот во MATLAB, ќе се врши со методот на Newton-Raphson во поларни координати.

#### 4.3.6 Моделирање на јазол со ветерна електрана за решавање на равенките на тековите на моќност

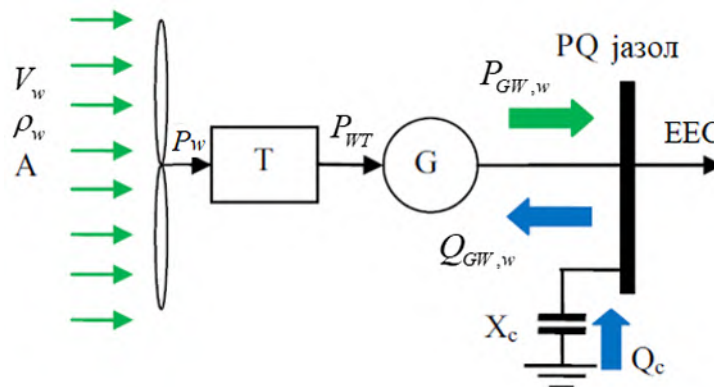
Според достапните информации за ветерните електрани, а поради помалите инвестициони трошоци, инвеститорите се одлучуваат за изведба на ветерна електрана со асинхронен генератор со константна аголна брзина и константна фреквенција, кој е поврзан на крута мрежа [98]. Овој факт е наведен поради анализа на однесувањето на електроенергетскиот систем, во услови кога на истиот е приклучена ветерна електрана, т.е. на електроенергетскиот систем составен од класични и обновливи извори на енергија.

Во оваа докторска дисертација ќе биде уважено и влијанието на обновливите извори на енергија т.е. ветерните електрани врз тековите на моќност и приликите во електроенергетскиот систем при стационарна состојба, а следствено и врз вкупните трошоци за работа на термоелектраните при оптимална работа на системот.

Анализата т.е. оптимизацијата на системот се врши со уважување на ветерната електрана составена од асинхрони генератори. Она што треба да се напомене е тоа дека при генераторски режим асинхроната машина врши конзумација на реактивна моќност од системот, односно троши реактивна моќност. Поради оваа причина, во пресметката на тековите на моќност, преку ова потпоглавје, посебно внимание ќе биде посветено на јазол со ветерна електрана. За потребите на оптималната работа на електроенергетскиот систем, којашто е тема на истражување на оваа докторска дисертација, ќе биде предложен модел за моделирање на јазол на кој е приклучена ветерна електрана.

Како што е веќе познато, реактивната моќност е во директна корелација со модулот на напонот. Врз основа на досега кажаното, може да се заклучи дека присуството на ветерната електрана (со асинхронен генератор) во системот директно влијае врз флукуациите на напонот во системот, односно врз тековите на моќност, а следствено и врз вкупните трошоци за работа на термоелектраните.

Постојат неколку пристапи за моделирање на ветерните електрани при пресметката на тековите на моќност, но секој од нив се базира на моделирање со помош на PQ или PU јазол. Доколку ветерната електрана работи во островски режим, тогаш таа се моделира со балансен т.е. U- $\theta$  јазол. За потребите на математичкото моделирање, потребно е еквивалентното коло на асинхрониот генератор да се интегрира во пресметката на тековите на моќност. Моделите најчесто се разликуваат по тоа што треба да се анализира и кои информации за ветерната електрана се достапни, како влезни параметри на моделот. Во оваа докторска дисертација е предложено моделирање на ветерната електрана со PQ јазол. На сликата 4.3 е прикажан модел на ветерна турбина при пресметката на тековите на моќност, со константна аголна брзина. Енергетските преобразувачи во ветерната турбина (на пример AC / DC и DC / AC), се занемаруваат во анализата на тековите на моќност.



Слика 4.3 Ветерна турбина со асинхронен генератор за пресметка на тековите на моќност

Ознаките на сликата 4.3 го имаат следното значење:

$A$  - зафатна површина на перките на турбината [ $m^2$ ]

$P_w$  - моќност на ветерот на влез на турбината [ $W$ ]

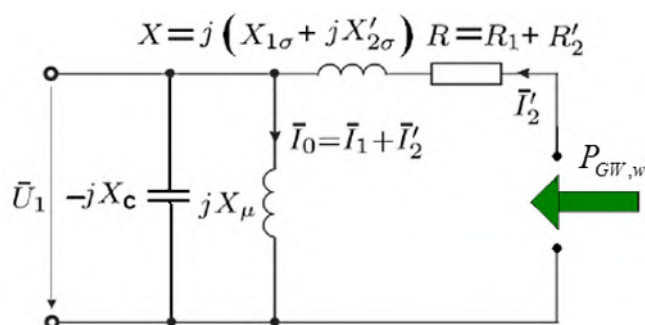
$P_{WT}$  - моќност на турбината [W]

$P_{GW,w}$  - активна моќност на ветроагрегат [W]

$Q_{GW,w}$  - реактивна моќност на ветроагрегат [VAr]

$Q_c$  - реактивна моќност на кондензаторската батерија [VAr]

Реактивната моќност  $Q_{GW,w}$  што ја конзумира асинхронниот генератор, се троши за генерирање на магнетен флуks и флуks на дисипација. Оваа реактивна моќност се напојува од ЕЕС или од кондензаторските батерии, како што е прикажано на блок шемата на слика 4.3 и на еквивалентниот дијаграм [99] кој е прикажан на слика 4.4.



Слика 4.4 Упростена еквивалентна шема на асинхронен генератор со кондензаторска батерија

Кондензаторската батерија има исклучително важна улога во работата на ветерните електрани со асинхронен генератор. Нејзината главна задача е да обезбеди реактивна енергија за асинхронниот генератор, а како додатна задача може да послужи и како компензационен уред во системот. Доколку јазолот со ветерната електрана во пресметката на тековите на моќност е моделиран како PQ јазол, тогаш треба однапред да се дефинира моќноста на кондензаторската батерија, како и реактивната моќност што ја троши асинхронниот генератор, во зависност од неговата активна моќност.

Најпрво се пресметува вредноста на кондензаторската батерија преку реактансата на магнетизирање  $X_M$ , а во согласност со изразот [100]:

$$C_{\min} = \frac{1}{\omega X_M} \quad (4.88)$$

За димензионирање на кондензаторската батерија, пресметката за минималната трифазна реактивна моќност, неопходна за напојување на реактансата на магнетизирање, се пресметува како:

$$Q_c = 3 \left( \frac{U_f^2}{\frac{1}{\omega C_{\min}}} \right) \quad (4.89)$$

Имајќи предвид дека номиналниот напон на кондензаторската батерија не е еднаков со напонското ниво на мрежата, добиената трифазна реактивна моќност на кондензаторската батерија треба да биде сведена на напонското ниво на мрежата, т.е.:

$$Q'_c = Q_c \left( \frac{U'}{U_n} \right)^2 \quad (4.90)$$

каде што

$U_n$  - номинален напон на кондензаторската батерија [kV]

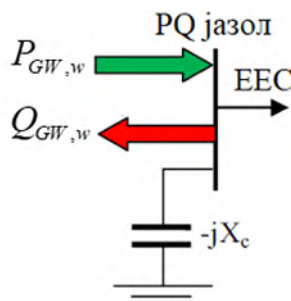
$U'$  - номинален напон на мрежата во точката на инјектирање [kV]

Конечно, во пресметката на тековите на моќност за PQ јазолот со ветерна електрана како влезни параметри се потребни: активната моќност на асинхронитот генератор  $P_g$  (со предзнак „ - “ бидејќи таа се однесува како негативен потрошувач т.е. со своето производство на активна моќност го редуцира вкупното активно оптоварување во системот), реактансата на кондензаторската батерија  $X_c$ , како и реактивната моќност на ветрогенераторот  $Q_{GW,w}$ , односно [99]:

$$X_c = \frac{|U_n|^2}{Q'_c} \quad (4.91)$$

$$Q_{GW,w} = \frac{X_c - X_m}{X_m X_c} U_1^2 + \frac{X}{U_1^2} P_{GW,w}^2 \quad (4.92)$$

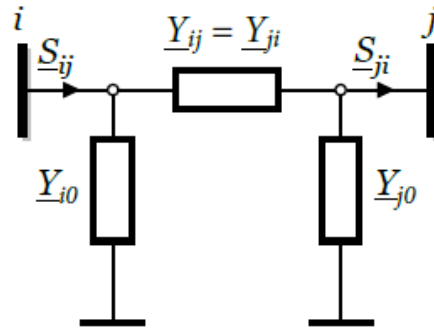
каде што параметрите во изразот (4.92) се одредуваат според еквивалентната шема, прикажана на слика 4.4. На слика 4.5 е прикажана графичката интерпретација на ветерната електрана, моделирана со PQ јазол.



Слика 4.5 Модел на ветерна електрана со PQ јазол

#### 4.4 ЗАГУБИ НА МОЌНОСТ НИЗ ВОД

По одредувањето на напоните на јазлите преку итеративна постапка, следен чекор е пресметка на тековите на моќност и загубите на моќност низ водовите [96]. Нека се разгледува вод кој поврзува два јазли и тоа  $i$  и  $j$ , како на сликата 4.6.



Слика 4.6 Модел на преносен вод за пресметка на текови на моќност

Доколку се усвои дека струјата  $I_{ij}$  на јазолот  $i$  е позитивна за насока  $i \rightarrow j$  тогаш

$$I_{ij} = I_i + I_{i0} = Y_{ij}(U_i - U_j) + Y_{i0}U_i \quad (4.93)$$

На сличен начин, ако се усвои дека струјата  $I_{ji}$  на јазолот  $j$  е позитивна за насока  $j \rightarrow i$  тогаш

$$I_{ji} = -I_i + I_{j0} = Y_{ji}(U_j - U_i) + Y_{j0}U_j \quad (4.94)$$

Комплексните моќности, т.е.  $S_{ij}$  од јазолот  $i$  кон јазолот  $j$  и  $S_{ji}$  од јазолот  $j$  кон јазолот  $i$  се

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = U_i I_{ij}^* = U_i (U_i^* - U_j^*) Y_{ij}^* + |U_i|^2 Y_{i0}^* \quad (4.95)$$

$$S_{ji} = P_{ji} + jQ_{ji} = U_j I_{ji}^* = U_j (U_j^* - U_i^*) Y_{ji}^* + |U_j|^2 Y_{j0}^* \quad (4.96)$$

Загубите на моќност низ водот  $i-j$  се дефинираат како алгебарска сума од тековите на моќност одредени од (4.82) и (4.83), т.е,

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (4.97)$$

# ВОВЕД ВО ОПТИМИЗАЦИЈА И АЛГОРИТМИ

---

Поглавје

5

## 5 ВОВЕД ВО ОПТИМИЗАЦИЈА И АЛГОРИТМИ

### 5.1 ПОИМ И КАТЕГОРИЗАЦИЈА НА ОПТИМИЗАЦИОНИТЕ ПРОБЛЕМИ

Според една дефиниција за оптимизацијата што често се наведува во современата светска литература, оптимизацијата претставува процес со кој се врши пронаоѓање на максимумот или минимумот на некоја функција [101]. Оптимизацијата нашла широка примена во секојдневниот живот, затоа што за многу проблеми и предизвици треба да се најде што е можно подобро решение. Како некои од многуте примери можат да се наведат оптимизација во сообраќајот, електроенергетиката, распоредот на извршување на задачите, итн. Во оваа докторска дисертација оптимизацијата се поврзува за доменот кој опфаќа електроенергетика, операциони истражувања и математика.

Научната гранка што се занимава со развојот на моделите и методите за решавање на математички формулираните проблеми за оптимизација, се нарекува теорија на оптимизацијата (анг. optimization theory). Со генерализација на теоријата на оптимизација и оптимизационите техники, се преминува кон поширока научна област што се нарекува применета математика (анг. applied mathematics).

Главна цел на оптимизацијата е пронаоѓање на оптималното или субоптималното (многу приближно на оптималното) решение во однос на дефинираната цел и потенцијалните ограничувања. Според некои извори од литературата, процесот на оптимизација може да се подели на следните фази, кои се извршуваат секвенцијално [102]: дефинирање на проблемот, формулирање и решавање на математичкиот дел на проблемот, валидација и имплементација на решението.

Функцијата на цел (анг. objective function) или со други зборови објективна, односно критериумска функција (како што е нарекувана во оваа докторска дисертација), претставува квантитативна мерка за перформансите на оптимизациониот проблем, а од друга страна за да може да започне оптимизациониот процес, неопходно е да се идентификува и формулира оваа функција. Исто така, критериумската функција може да се дефинира и како мерка со којашто се утврдува квалитетот на решението на оптимизациониот проблем и којашто овозможува споредба на различни решенија со цел избор на најдоброто. Со други зборови, критериумската функција овозможува на секој вектор од управувачки променливи (решение) да се придружи негова соодветна вредност, којашто претставува мерка за неговиот квалитет.

Формулацијата на критериумската функција зависи од оптимизациониот проблем кој е потребно да се реши, а таа на пример може да биде вредност на некоја функција, остварен профит, најмал број елементи во некој систем, трошоци, или која било друга мерка или нивна комбинација што се прикажува како еден број [101].

Карактеристиките на оптимизациониот проблем се нарекуваат променливи или варијабли. Потребно е да се пронајде вредноста на променливите коишто ја оптимизираат критериумската функција. За голем број оптимизациони проблеми од секојдневниот живот, променливите можат да имаат само одредени вредности, а од друга страна голем број оптимизациони проблеми вклучуваат и соодветни ограничувања.

Терминот кој е во тесна корелација со оптимизацијата е моделирањето што се дефинира како процес со кој се утврдува критериумската функција, променливите и соодветните ограничувања на поставениот оптимизационен проблем [101]. При математичкото моделирање на моделот, особено на практичните проблеми, треба да се

води сметка за неговата сложеност. Во прв случај, ако математичкиот модел е премногу едноставен, тој нема да може реално да ги моделира сите својства на проблемот за кој се однесува. Од друга страна, во случај на премногу комплексен математички модел, ни една оптимизациона метода нема да може успешно да го реши. Во доста случаи при математичкото моделирање на оптимизационен проблем од реалното опкружување се користат апроксимации, но на начин така што ќе се задржат клучните својства на дадениот проблем како и квалитетот на добиеното решение. Соодветната оптимизациона метода се применува по завршување на математичкото моделирање на проблемот.

Во процесот на решавање на оптимизационот проблем, се врши избор на решение што ја максимизира или минимизира критериумската функција и ги задоволува сите ограничувања. Кога се говори за оптимизација, најчесто во литературата станува збор за минимизација, што е случај и во оваа докторска дисертација.

Проблемот оптимизација за специјален случај  $R^n$ , може да се формулира математички на следниот начин:

$$\begin{aligned} &\text{за дадено } f : R^n \rightarrow R \\ &\text{да се пронајде } x^* \in R^n, \text{ со задоволување на условот,} \\ &\forall x \in R^n, f(x^*) \leq f(x) \end{aligned} \tag{5.1}$$

каде  $R^n$  означува простор на варијабли (пребарувачки простор) на функцијата  $f$ , а нотацијата  $x \in R^n$  означува потенцијално решение на проблемот, додека оптималното решение е означено со  $x^*$ . Променливата  $n$  се однесува на величината на пребарувачкиот простор, во смисла број на димензија на оптимизациониот проблем и во оваа формулација претставува број на променливи на критериумската функција.

### 5.1.1 Таксономија на оптимизационите проблеми

За потребите на таксономијата<sup>2</sup> на оптимизационите проблеми можат да се користат различни критериуми, па според тоа можат да се направат поголем број класификации. Во продолжение се прикажани само оние категоризации што се релевантни за истражувањето коешто е извршено за потребите на оваа докторска дисертација.

Во согласност со претходно наведеното, анализирана е класификација на оптимизационите проблеми врз основа на три критериуми: според типот на променливите, во однос на критериумот дали оптимизациониот проблем има или нема ограничувања, како и врз основа на бројот на критериумски функции.

#### 5.1.1.1 Категоризација според типот на променливите

Кога се зема предвид критериумот што се базира на типот на променливите, оптимизационите проблеми се делат на комбинаторни (анг. combinatorial optimization) и на континуални (анг. continuous optimization), каде што во првиот случај променливите имаат дискретни вредности, а во вториот случај непрекинати (реални вредности).

---

<sup>2</sup>Таксономија – Наука која се занимава со распознавање на видовите и нивно распоредување во систем на класификација



Во случај на проблем со дискретна (комбинаторна) оптимизација, постои ограничување променливите да можат да имаат само одредени вредности од множеството реални броеви. Обично станува збор за множеството природни броеви, множеството природни броеви со нула или бинарното множество.

Општа формулација на дискретна оптимизација [103]: дадено е конечното множество  $E = e_1, e_2, \dots, e_n$ . За секој елемент на множеството  $e \in E$  дефинирана е функција  $\omega(e)$  таква да [103]:

$$\omega: E \rightarrow R \quad (5.2)$$

Допустливото множество на проблемот со комбинаторна оптимизација се дефинира како [103]:

$$X \subseteq P(E) \quad (5.3)$$

при што секое допустливо решение  $x \in X$ , всушност  $x \in E$ . Критериумската функција на проблемот со дискретна оптимизација, најчесто се формулира на следниот начин:

$$f(x) = \sum_{e \in x} \omega(e) \quad (5.4)$$

додека оптимизациониот проблем со дискретна оптимизација се формулира како [103]:

$$\begin{aligned} \min \sum_{e \in x} \omega(e) \\ \text{n.o.} \\ x \in X \end{aligned} \quad (5.5)$$

Врз основа на претходно наведеното, оптимизациониот проблем со дискретна оптимизација во општ случај може да се формулира на следниот начин [103]:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{n.o.} \\ x \in X \end{aligned} \quad (5.6)$$

каде  $X$  претставува конечно множество и важи  $f(x): X \rightarrow R$ .

Голем број практични проблеми припаѓаат во категоријата комбинаторна оптимизација, како на пример проблемот за оптимално ангажирање на агрегатите во погон.

Континуалната (непрекината) оптимизација ги опфаќа сите проблеми, кај кои променливите можат да имаат реални вредности. Како посебен случај на континуалната оптимизација, каде што постојат голем број локални оптимуми, кои не е можно сите да се пребарат и каде е потребно да се пронајде глобалното оптимално решение (анг. global optimum), се наведува глобалната оптимизација (анг. global optimization). Овој тип оптимизација укажува на тоа дека може да се дефинира локален оптимум, но истиот важи само за ограничен интервал на разгледување. Доколку се анализира целиот интервал може да постојат повеќе локални оптимуми и еден или повеќе глобални оптимуми.



Слика 5.1 Пример на проблем со глобална оптимизација

За решавање на проблемот глобална оптимизација најчесто се применува метахевристичката, со којашто се врши процес на пребарување со помош на процесите интензификација и диверзификација, а за голем број практични проблеми таа успева да го пронајде глобалното оптимално решение или оптималното решение со задоволителен квалитет.

Исто така е корисно да се напомене дека некои оптимизациони методи, како што се методите со локално пребарување (анг. local search methods), ја бараат само точката чијашто вредност на критериумската функција е помала од вредноста на критериумските функции на точките што се наоѓаат во нејзината околина (соседство) [101]. Познати примери на таквите методи што не можат да се применат на проблеми со глобална оптимизација, затоа што не го пронаоѓаат глобалниот, туку локалниот оптимум, се hill-climbing методот и Њутновниот метод (анг. Newton method).

Општата формулација на оптимизационен проблем со глобална континуална оптимизација е прикажана како:

$$\min f(x) \quad (5.7)$$

каде што  $x \in R^n$  претставува реален вектор (вектор на управувачки променливи) со  $n \geq 1$  компонента, додека функцијата којашто се минимизира има облик:  $f: R^n \rightarrow R$ . Во случај на ваков проблем, оптимизациониот метод нема познавање за критериумската функција  $f$ , туку има само можност да ја пресмета нејзината вредност во произволна точка.

#### 5.1.1.2 Категоризација според ограничувањата

Оптимизационите проблеми можат да се класифицираат и во зависност од тоа дали постојат ограничувања, при што се разликуваат проблеми со условна оптимизација (оптимизација со ограничувања) и безусловна оптимизација (оптимизација без ограничувања).

Кај класата проблеми со безусловна оптимизација (анг. unconstrained optimization), променливите добиваат вредности во рамките на дозволените долни и горни граници, поради што овој тип проблеми во литературата се нарекува уште и безусловна оптимизација со ограничувања на вредностите на променливите (анг. bound-constrained

optimization). Проблемите со континуална безусловна оптимизација (анг. continuous global unconstrained optimization), можат да се формулираат на следниот начин:

$$\min f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in S \subseteq R^n \quad (5.8)$$

каде што  $S \subseteq R^n$  претставува пребарувачки простор, додека  $n$  е број на димензија на проблемот. Понатаму,  $S$  е  $n$ -димензионален хипер-квадар во просторот  $R^n$  кој е дефиниран со долните и горните граници на вредностите на променливите, т.е.:

$$lb_i \leq x_i \leq ub_i, 1 \leq i \leq n \quad (5.9)$$

каде што  $lb_i$  и  $ub_i$  респективно претставуваат горна и долна граница на променливата  $i$ .

Точката  $x^* \in R^n$  што ги задоволува ограничувањата за вредностите на променливите (во согласност со изразот (5.9)) и во случај на проблем со минимизација, за нејзината критериумска функција да важи:

$$f(x^*) \leq f(x), \forall x \in R^n \quad (5.10)$$

се нарекува оптимално решение на проблемот со континуална безусловна оптимизација.

Ако за решавање на оптимизациониот проблем бидат поставени ограничувања, тогаш допустливиот регион на пребарувачкиот простор значително се стеснува. Решенијата што ги задоволуваат сите поставени ограничувања се нарекуваат допустливи (анг. feasible), додека решенијата што не ги задоволуваат сите претходно поставени ограничувања се нарекуваат недопустливи (анг. infeasible).

Континуалната условна оптимизација (анг. continuous constrained optimization) се дефинира на следниот начин:

$$\min f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5.11)$$

каде што  $x \in F \subseteq S \subseteq R^n$ , додека  $S$  претставува хипер-квадар ограничен со изразот (5.9).

Доменот на пребарувачкиот простор со допустливите решенија  $F \subseteq S$  се одредува со помош на  $m$  линеарни и нелинеарни ограничувања т.е.:

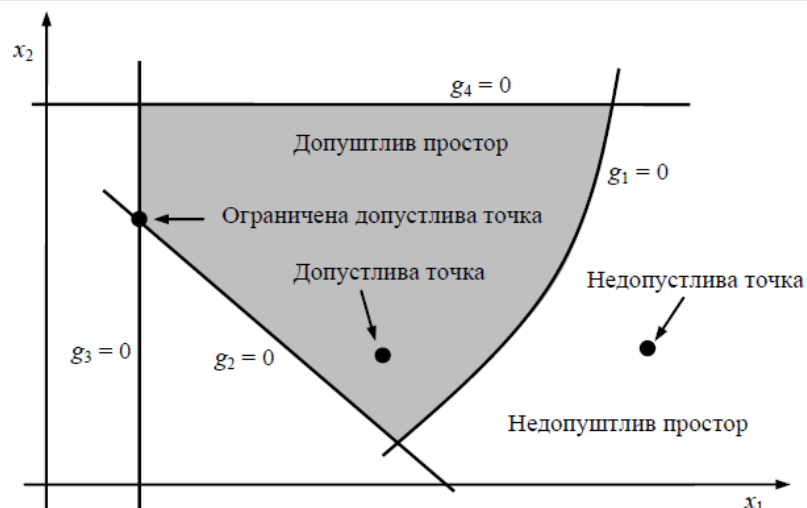
$$\begin{aligned} g_j(x) &\leq 0, \text{ за } j = 1, \dots, q \\ h_j(x) &= 0, \text{ за } j = q + 1, \dots, m \end{aligned} \quad (5.12)$$

каде што со  $q$  се означува вкупниот број ограничувања од типот неравенство (анг. inequality constraints), додека  $(m - q)$  претставува вкупен број ограничувања од типот равенство (анг. equality constraints). Освен наведеното, во секоја точка  $x \in F$  сите ограничувања  $g_k$  коишто го задоволуваат равенството  $g_k(x) = 0$ , се нарекуваат активни ограничувања во точката  $x$ .

Точката  $x^* \in S$  којашто ги задоволува сите ограничувања (дефинирани со изразот (5.12)) и за чијашто вредност на критериумската функција важи:

$$f(x^*) \leq f(x), \forall x \in S \quad (5.13)$$

се нарекува глобално оптимално решение на проблемот.



Слика 5.2 Пребарувачки простор со криви на ограничувања

Со цел успешно решавање на оптимизациониот проблем со ограничувања, најчесто треба во оптимизациониот алгоритми да се интегрира некој од методите за справување со ограничувањата (ang. constraint handling). Како некои од најчесто користените категории на техники за справување со ограничувањата, се наведуваат следните [104 - 107]:

- казнени т.е. пенализациони функции (анг. penalty functions);
- Дебови правила;
- посебни оператори;
- раздвојување на критериумската функција и ограничувањата;
- декодери.

Општата формулација на казнените функции може да се прикаже како [108]:

$$\phi(x) = f(x) + p(x) \quad (5.14)$$

каде што  $\phi(x)$  означува проширена критериумска функција, а  $p(x)$  пенализациона функција којашто во литературата најчесто се пресметува како  $v$  [108]:

$$p(x) = \sum_{i=1}^m r_i \cdot \max(0, g_i(x))^2 + \sum_{j=1}^p c_j \cdot |h_j(x)| \quad (5.15)$$

каде што  $r_j$  и  $c_j$  се позитивни константи коишто се нарекуваат фактори на пенализација.

Наједноставната пенализациона функција во литературата е позната како „смртна казна“, што функционира на тој начин што на најлошите решенија ѝ доделува најлоша, односно најголема вредност, со којашто се елиминираат од понатамошниот оптимизационен процес. Постојат голем број пенализациони функции коишто имаат фиксни фактори на пенализација во текот на целиот оптимизационен процес. Главниот недостаток на ваквите функции е генерализацијата, на пример вредностите што се соодветни за еден проблем, најчесто не се за друг. Од друга страна, постојат и т.н. адаптивни пенализациони функции, коишто користат информации од оптимизациониот процес и врз нивна основа динамички ги ажурираат своите пенализациони фактори. Во оваа докторска дисертација ќе биде применет токму овој пристап, но со тоа што ќе биде

моделирана и применета нова адаптивна пенализациона функција со адаптивен фактор на пенализација т.е. novel self-adaptive penalty factor.

Наспроти едноставната имплементација, примената на пенализационите функции бара внимателно подесување на вредностите на факторите на пенализација, коишто ја одредуваат големината на казната на недопустливите решенија. Универзални подесувања не постојат, туку за секој проблем треба да се пронајде оптималната вредност на факторите на пенализација по принципот trial-error [109].

Декодерите (анг. decoders) долго време се сметале за најдобра техника за справување со ограничувањата. Тие се темелат на идејата за мапирање на допустливиот регион  $F$  од пребарувачкиот простор  $S$  на декодиран простор кој е полесен за оптимизација. Процесот на мапирање на декодерот мора да гарантира дека секое допустливо решение од  $S$  е вклучено во декодираниот простор и дека секое декодирано решение одговара на одредено допустливо решение во  $S$ . Освен тоа, процесот на трансформација мора да биде брз и пожелно е малите промени во  $S$  на оригиналниот проблем да имплицираат мали промени на декодираниот простор [108]. Koziel и Michalewicz предложиле НМ (homomorphous maps), каде допустливиот регион се мапира на  $n$ -димензионална коцка [110]. Иако декодерите се интересна техника од теоретска перспектива, нивната имплементација е прилично комплицирана и значајно ги зголемуваат трошоците за пресметка (компјутерска техника), па поради тоа тие денес ретко се користат.

Посебниот оператор (анг. special operator) се применува како начин да се зачува допустливоста на решението или како начин за пренасочување на процесот на пребарување во рамките на занимливиот дел од пребарувачкиот простор, како што се на пример границите на допустливиот домен.

За разлика од пенализационите функции што ја комбинираат критериумската функција и ограничувањата во една функција, техниката на одвојување на критериумската функција од ограничувањата функционира потполно спротивно. Така на пример, квалитетот на решението  $x$  се одредува според следниот израз [108]:

$$f(x) = \begin{cases} f(x), & \text{ако е допустливо} \\ 1 + r \left( \sum_{i=1}^m g_i(x) + \sum_{j=1}^p h_j(x) \right), & \text{ако е недопустливо} \end{cases} \quad (5.16)$$

Од изразот (5.16) се гледа дека квалитетот на допустливото решение е секогаш подобар од квалитетот на недопустливото решение, чијшто квалитет зависи од сумата на прекршените ограничувања.

Од современите пристапи за справување со ограничувањата треба посебно да се издвои методата што ја предложил Deb [105]. Оваа техника, која во литературата е позната како Дебови правила, се смета за една од најефективните методи за справување со ограничувањата. Овој пристап три критериуми за допустливост т.е.:

1. кога се споредуваат две допустливи решенија, се избира решението коешто има подобра вредност на критериумската функција;
2. кога се споредува едно допустливо со едно недопустливо решение, секогаш се бира допустливото решение;
3. кога се споредуваат две недопустливи решенија, се избира решението коешто има помала вредност на сумата на прекршени ограничувања.

Сумата од вредностите на прекршените ограничувања се пресметува на следниот начин [105]:

$$\phi(x) = \sum_{i=1}^m (\max(0, g_i(x)))^2 + \sum_{j=1}^p |h_j(x)| \quad (5.17)$$

каде вредностите на секое од ограничувањата од тип неравенство  $g_i(x), i = 1, \dots, m$  и ограничувањата од тип равенство  $h_j(x), j = 1, \dots, p$ , се нормализирани.

Стохастичкото рангирање (SR) коешто е креирано со цел да се исправат недостатоците на пенализационите функции (преголеми или премали пенали поради погрешни вредности на факторите на пенализација), први го предложиле Runarsson и Yao [109]. Наместо факторите на пенализација, стохастичкото рангирање воведува параметар  $P_f$  што ги контролира критериумите за споредување на недопустливите решенија и тоа: врз основа на сумата од прекршените ограничувања или само врз основа на вредноста на критериумската функција. Токму ваквата современа техника за справување со ограничувањата ќе биде прикажана во наредните поглавја, но и за првпат применета и адаптирана на ваков оптимизационен проблем во оваа докторска дисертација.

### 5.1.1.3 Категоризација според бројот на критериумски функции

Доколку се земе предвид бројот на критериумски функции т.е. функции на цел (критериуми), оптимизационите проблеми можат да се поделат на проблеми со една функција на цел (анг. single-objective optimization) и на проблеми со повеќе функции на цел (анг. multi-objective optimization -МОО). Во литературата, оптимизацијата со една функција на цел е позната и како еднокритериумска оптимизација, додека за оптимизацијата со повеќе функции на цел се користи терминот повеќекритериумска оптимизација.

Во случај на проблем со повеќе критериумски функции, постојат повеќе цели кои е потребно истовремено да се оптимизираат, при што тие цели најчесто се контрадикторни една на друга. На пример, со подобрувањето на првата цел, другата цел се влошува и обратно.

Проблемите со повеќекритериумска оптимизација често се сретнуваат во секојдневниот живот во разни области, како на пример во менаџментот, финансиите, електроенергетиката итн.

Постојат повеќе начини за решавање на повеќекритериумската оптимизација, односно: пристап со тежинска сума (анг. weighted sum) [111], хиерархија на целите [112] и концепт на Парето оптималност [113]. Поради релевантноста со истражувањето што е прикажано во докторската дисертација, тие нема да подлежат на понатамошни разгледувања, бидејќи се решава оптимизационен проблем со една критериумска функција.

## 5.1.2 Алгоритми и класи на комплексност

Пред воведување на класата на комплексност, треба да се обрати внимание на сложеноста на алгоритмот, особено на временската и просторната компонента на сложеност.

Во современата литература е воведен концепт на квантификација на времето што е потребно за извршување на алгоритмот, поради тоа што често се случува еден ист алгоритам за помалку влезни параметри да успева да генерира резултат во разумен временски период (во согласност со сложеноста на математичкиот модел), додека за повеќе влезни параметри неговото извршување трае неприфатливо долго, па поради тоа е практично неупотреблив.

Времето на извршување на алгоритмот е познато како временска сложеност, што се одредува како број на чекори за извршување (анг. *computation steps*), кои е потребно да ги изврши алгоритмот, со цел успешно решавање на оптимизациониот проблем. Меѓутоа, со обзир на тоа дека под чекор за извршување се подразбираат различни операции што траат различно, како и тоа дека времето на пресметка на чекорите зависи од компјутерскиот систем, за секој алгоритам се одредува основен чекор, чиешто траење е една временска единица.

Освен времето на извршување, важна е и просторната сложеност на алгоритмот, што се однесува на потрошувачката на мемориски ресурси, т.е. на големината на меморијата којашто е потребна за извршување на алгоритмот. При евалуацијата на просторната сложеност, складишниот капацитет што е потребен за чување на влезните податоци најчесто се занемарува.

Еден оптимизационен проблем е составен од збир на индивидуални задачи, каде што индивидуална задача претставува инстанца на проблемот што се оптимизира со конкретни параметри. Може да се констатира дека проблемот може да се реши со алгоритам (алгоритамски решлив проблем) ако и само ако на располагање стои алгоритам кој успешно може да се примени на секоја поединечна задача од оптимизациониот проблем, а притоа таквиот алгоритам треба да ја реши задачата во разумен временски период со користење расположливи компјутерски ресурси.

Таксономијата на оптимизационите проблеми врз основа на критериумот тежина на проблемот е дефинирана во теоријата за комплексност на пресметувањата (анг. *computation complexity theory*). Минималниот обем (количина) на просторните и временските компјутерски ресурси што се неопходни за решавање на проблемот, претставуваат основа за дефинирање на тежината на проблемот [114], каде тежината на проблемот е во блиска корелација со сложеноста на алгоритмот. Поради тоа, поаѓајќи од временската и просторната сложеност на алгоритмот, можно е да се одредат горната и долната граница за тежината на проблемот [102].

Во класата на комплексност  $P$  (анг. *polynomial time*) припаѓаат оние проблеми кои во општ случај можат да бидат решени со примена на некои од достапните алгоритми за полиномска сложеност. Од друга страна,  $NP$  (анг. *non-deterministic polynomial time*) класата на комплексност се однесува на група проблеми чиешто решенија можат да се проверат (верифицираат) со примена на алгоритам за полиномска комплексност.

За истражувањето што е прикажано во оваа докторска дисертација посебно е значајна класата на  $NP$  тешки (анг. *NP hard*) проблеми, којашто ги опфаќа проблемите за кои не постои полиномски алгоритам со чијашто помош тие можат да се решат и со кој можат да се трансформираат од едни во други во полиномско време. Со други зборови, алгоритмот што се користи за решавање на  $NP$  тежок проблем, може во полиномско време да се редуцира на друг алгоритам којшто може да реши каков било проблем од класата  $NP$  [102].

## 5.2 ТАКСОНОМИЈА НА ОПТИМИЗАЦИОНИТЕ АЛГОРИТМИ

Постојат повеќе критериуми за класификација на оптимизационите алгоритми. Една од поделбите е на детерминистички (анг. deterministic) и стохастички (анг. stochastic).

Детерминистички алгоритам е алгоритам кој при секое извршување, под кои било услови, од истиот влез доаѓа до истиот излез, притоа следејќи ја секојпат истата низа наредби. Меѓутоа, за проблемите со повеќе димензии и покомплицираните функции кои имаат повеќе локални оптимуми, детерминистичките алгоритми не се во состојба да го пронајдат оптималното решение, бидејќи за негово пронаоѓање се потребни многу компјутерски ресурси. Во случај на NP тешки проблеми, колку и да е големо зголемувањето на ресурсите, со примена на детерминистичките методи, времето на пресметка нема да се намали на прифатливо ниво.

Некои детерминистички алгоритми се извршуваат во итерации. Извршувањето на алгоритмот  $A$ , е итеративен процес ако целта е да се генерира ново и подобро решение  $x^{t+1}$ , врз основа на модификација на моменталното решение  $x^t$  во итерацијата, или временскиот момент  $t$ . Така на пример, детерминистичкиот Њутн-Рафсонов метод кој ја пронаоѓа оптималната вредност на функцијата  $f(x)$ , е еквивалентен на пронаоѓањето на критичните точки од  $f'(x) = 0$  во  $n$ -димензионален простор [115]:

$$x^{t+1} = x^t - \frac{f'(x^t)}{f''(x^t)} = A(x^t) \quad (5.18)$$

Од изразот (5.18) очигледно е дека брзината на конвергенција може да биде мала во близина на оптималната точка, каде важи  $f'(x) \rightarrow 0$ . Во голем број практични примени, брзината на конвергенција на алгоритмите не е задоволителна. Едноставен начин за подобрување на брзината на конвергенција е воведување на параметарот  $p$  во изразот (5.18), односно [115]:

$$x^{t+1} = x^t - p \frac{f'(x^t)}{f''(x^t)}, \quad p = \frac{1}{1 - A'(x^*)} \quad (5.19)$$

каде  $x^*$  е оптимално решение или фиксна точка. Во општ случај, изразот (5.19) може да се напише како:

$$x^{t+1} = A(x^t, p) \quad (5.20)$$

Првите методи што се користени во решавањето на проблемите на глобалната оптимизација биле детерминистички и главно базирани на принципот „раздели, па владеј“ (анг. divide-and-conquer). Тие за првпат биле применувани во доцните 50-ти години од минатиот век, со растот на употребата на компјутерските пресметки за потребите на истражувањата. За разлика од претходните принципи, техниката „раздели, па владеј“ користи итеративен приод на оптимизационите методи што се користат на компјутер: намалување на сложеноста на теоретските структури и потпирање на интензивни пресметки што го истражуваат пребарувачкиот простор. Според тоа, оваа метода го дели проблемот на повеќе потпроблеми и со тоа ја намалува комплексноста. Типичен претставник на оваа техника е методот branch andbound (BB). Овој алгоритам генерира потпроблеми, така што главниот проблем се декомпонира на гранки (на пример



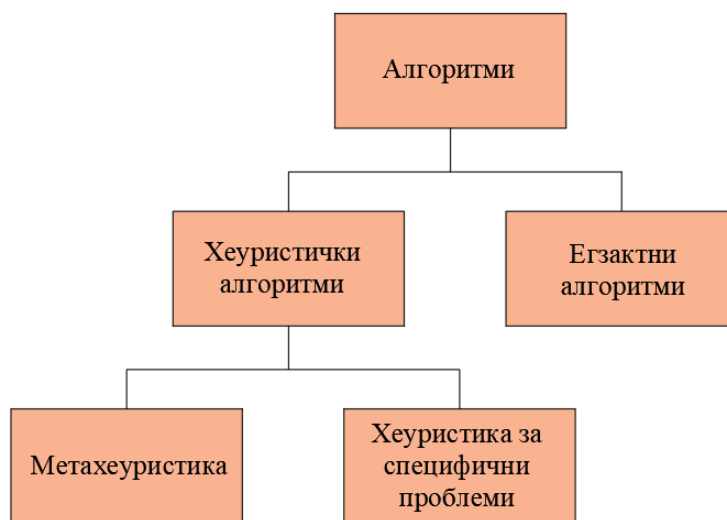
секоја променлива може да биде една гранка) и како таков може успешно да се примени на проблеми со дискретни ентитети.

Во литературата можат да се најдат голем број примени на ВВ методот. Така на пример, ВВ е применет на широк спектар на инженерски проблеми, како што се проблемите што се однесуваат на производни линии [116] и енергетски системи [117].

Од друга страна, стохастичката оптимизација се однесува на оптимизација кога случаен елемент влијае на изборот на следниот чекор во пресметката. Стохастичкиот алгоритам при различен старт т.е. почетно решение генерално доаѓа по различен пат. Компјутерите не вршат случаен избор и кај нив случајноста се симулира со помош на генератор на псевдо-случајни броеви. Доказите за конвергенција на стохастичките алгоритми се вршат со помош на теоријата на веројатност. Понатаму, треба да се напомене дека оваа група алгоритми своето пребарување го базира на случајност.

Голем број оптимизациони алгоритми и методи припаѓаат во групата на стохастички оптимизациони методи, како што се методата Монте Карло, еволуциските алгоритми (во кои припаѓа и генетскиот алгоритам кој е предмет на истражување на оваа докторска дисертација), алгоритмите базирани на интелигенција на роеви итн. Следното потпоглавје е посветено на овите методи.

Според уште една поделба, која користи нешто поразлична терминологија од претходната, оптимизационите алгоритми се делат на егзактни и на хеуристички [118]. Хеуристичките алгоритми се делат на хеуристички за специфични проблеми и на метахеуристички. Егзактните алгоритми соодветстуваат на класата детерминистички, а хеуристичките се итеративни кои од чекор до чекор, притоа со користење на моменталната ситуација, донесуваат одлуки по кој пат би продолжиле. Хеуристичките методи најчесто пронаоѓаат задоволителни решенија во релативно краток временски период. Наведената поделба е прикажана на слика.



Слика 5.3 Поделба на оптимизационите алгоритми

## 5.3 МЕТАХЕВРИСТИЧКА ОПТИМИЗАЦИЈА

### 5.3.1 Поим и категоризација на хеуристиката

За разлика од егзактните оптимизациони методи кои гарантираат пронаоѓање на оптималното решение, хеуристичките алгоритми се трудат да најдат што е можно

подобро решение, но не можат да гарантираат дека пронајденото решение е и оптимално [119]. За решавање на многу практични и benchmark проблеми не е можна примената на егзактни методи, затоа што за нивно решавање би било потребно многу време.

Хевристиката се користи за решавање конкретни и специфични проблеми, така што ги користи индивидуалните својства на самите проблеми при нивно решавање. Зборот хевристика потекнува од старогрчкиот збор *heuriskein*, што значи уметност за пронаоѓање нов начин (правила) во решавањето на проблемот. Во последните децении дошло до нагло зголемување на развојот на хевристичките методи за решавање на разни оптимизациони проблеми. За ова сведочи големиот број објавени научни трудови што се посветени на хевристиката.

Меѓутоа, и покрај основната причина за примена на хевристиката (неможноста на егзактните методи да го пронајдат оптималното решение во прифатлив временски период), постојат и додатни причини како што се [119]:

- за даден проблем не постои метода што може да го реши на оптимален начин;
- иако е расположлива егзактната метода за даден проблем, таа не може да се примени на расположливиот хардвер;
- хевристичките методи се пофлексибилни од егзактните методи, така што овозможуваат моделирање на додатни карактеристики на реалниот проблем;
- хевристичките методи често се користат како дел од глобалната процедура на пребарување што гарантира пронаоѓање оптимално решение на дадениот проблем.

Општо е прифатено дека добар хевристички алгоритам треба да ги поседува следните својства [119]: решението треба да се добие во прифатлив временски период, хевристиката треба да даде решение што со голема веројатност е близу до оптималното и веројатноста за добивање лошо решение треба да биде минимална.

Со оглед на тоа дека хевристичките методи меѓусебно се разликуваат, многу е тешко да се даде нивна потполна класификација [120]. Поради тоа, во светската литература може да се најде на голем број таксономии на овие методи.

Според една поделба, хевристичките методи се делат на [119]:

- декомпозициони методи (анг. *decomposition methods*) што го разложуваат основниот проблем на помали потпроблеми коишто се полесни за решавање, а притоа се води сметка сите потпроблеми да имаат исти својства со основниот проблем;
- индуктивни методи (анг. *inductive methods*) што ја генерализираат помалата, или поедноставната верзија на проблемот. Техниките коишто може да се применат на оваа верзија, можат да се применат и на цел проблем;
- редуccionи методи (анг. *reduction methods*) коишто вршат идентификација на атрибутите на добрите решенија на проблемот и ги воведуваат во оптимизациониот процес во форма на граници на проблемот. Целта е да се ограничи просторот на потенцијалните решенија преку симплификација на

основниот проблем. Притоа се јавува ризик од изоставување на оптималните решенија на основниот проблем;

- конструктивни методи (анг. *constructive methods*) што го градат т.е. оформуваат решението од самиот почеток, по принцип „чекор по чекор“. Во оваа група главно припаѓаат детерминистичките алгоритми, коишто се базираат на најдобриот избор во секоја итерација, а претежно се користат за решавање на стандардните проблеми со комбинаторна оптимизација;
- методи со локално пребарување (анг. *local search methods*) што го започнуваат процесот на пребарување, така што генерираат допустливо решение на проблемот што настојуваат да го исправат во итеративниот процес. Кај ваквите методи во секој чекор едно решение се поместува кон друго коешто има подобра вредност на критериумската функција.

Освен наведените методи, значајни се и следните: хевристика на математичкото програмирање, како и хевристика базирана на поделбата на допустливиот простор, рестрикција на допустливиот простор и на релаксација.

Хевристиката на математичкото програмирање процесот на оптимизација го започнува со математичка формулација на моделот на оптимизациониот проблем, а потоа настојува да го реши проблемот со приближни т.е. апроксимативни методи. Целата област на математичкото програмирање може да се подели на линеарно, нелинеарно, дискретно и стохастичко програмирање како и на теорија на игри. Заедничка особина на сите наведени методи е тоа што тие ја бараат точката во даден векторски т.е. пребарувачки простор која задоволува некои (или сите) ограничувања, а во која критериумската функција достигнува екстремна вредност.

Хевристиката базирана на поделба на допустливиот регион, најпрво го дели допустливиот регион на повеќе подрегиони, а потоа со парцијално пребарување на секој подрегион го пронаоѓаат најдоброто решение. Хевристичкото решение е решението за кое критериумската функција има најдобра вредност.

Методите што се темелат на рестрикција на допустливиот регион, процесот на пребарување го вршат така што елиминираат одредени подрегиони од допустливиот регион преку рестрикција, со што се намалува пребарувачкиот простор. Ова овозможува полесно решавање на новиот апроксимативен оптимизационен проблем.

Конечно, хевристиката што користи релаксација, функционира на спротивен принцип од методата со рестрикција. Оваа хевристичка метода го проширува допустливиот регион, но на тој начин што ќе се овозможи полесно решавање на новодобиениот апроксимативен оптимизационен проблем.

Од сите прикажани хевристички методи, конструктивните и методите со локално пребарување често се применувани во метахевристичките алгоритми.

### 5.3.2 Метахевристички алгоритми

Со оглед на фактот дека хевристичките методи и алгоритми се покажале како робусни оптимизациони методи за голем број проблеми, во последните децении многу истражувачи ширум светот покажале голем интерес за нивен развој и унапредување. Овој напор резултирал со настанување на метахевристиката, како универзален тип на хевристика за широк спектар проблеми.

Наспроти хевристиката, метакхевристиката опфаќа генерички групи правила што можат да се применат за решавање на голем број оптимизациони проблеми. Основните принципи на овие алгоритми се базираат на општите оптимизациони алгоритми коишто користат итеративни механизми како би го поправиле постоечкото решение.

Од многубројните дефиниции за метакхевристиката, овде ќе биде наведена една по која метакхевристиката претставува низа алгоритамски концепти коишто се користат за дефинирање на хевристичките методи што се применливи на широк спектар проблеми [120]. Исто така, метакхевристиката може да се дефинира и како хевристика за општа намена чијашто главна задача е насочување на проблемски специфичната хевристика кон подрачјето на пребарувачкиот простор, во кое се наоѓаат добри решенија. Со други зборови, метакхевристиката претставува метод за пронаоѓање добра хевристика за одреден проблем.

Корените на метакхевристичките методи се наоѓаат во машинското учење (анг. machine learning), еволуциските алгоритми (анг. evolutionary algorithms - EA) и фази логиката (анг. fuzzy logic). Метакхевристиката дава одговор на следните прашања: кои вредности на параметрите даваат добри резултати при примена на хевристиката  $x$  на проблемот  $y$ ; на кој начин е можно да се приспособат параметрите на хевристиката  $x$  со цел да се добијат подобри решенија за проблемот  $y$  и дали е подобра хевристиката  $x$  или хевристиката  $y$ .

Успешната примена на метакхевристиката во многу области сведочи за нејзината ефикасност и ефективност во решавањето големи и сложени проблеми. Некои од примените на метакхевристиката за решавање секојдневни проблеми од реалниот свет опфаќаат [120]:

- проблеми со инженерскиот дизајн, оптимизација на топологија и структурална оптимизација во електрониката и VLSI (very large scale integration) дизајнот, аеродинамични и динамични флуиди, телекомуникацијата, автомобилската индустрија и роботика;
- машинско учење и прибирање податоци во биоинформатиката, пресметковната биологија и финансиите;
- системско моделирање, симулација и идентификација во физиката, хемијата и биологијата и
- проблеми со ротирање и планирање, проблеми со распределбата и производството во логистиката и транспортот, проблеми со управувањето со синџирите за снабдување, итн.

Во литературата постојат голем број критериуми за класификација на метакхевристиката. Според една поделба, метакхевристиката се дели на [120]:

- детерминистичка (анг. deterministic) и стохастичка (анг. stochastic) метакхевристика. Детерминистичката метакхевристика пристапува кон решавање оптимизациони проблеми, така што донесува детерминистички одлуки, како на пример локално пребарување (анг. Local Search – LS) и табу пребарување (анг. Tabu Search - TS). Стохастичките методи во процесот на барање користат случајни правила, како на пример кај симулираното калење (анг. Simulated Annealing – SA) и еволуциските алгоритми (анг. evolutionary algorithms - EA). Кај детерминистичката метакхевристика секогаш таа почетна популација генерира исто конечно решение, додека кај

стохастичката метахевристика може да се генерираат различни конечни решенија со помош на иста почетна популација. Наведените карактеристики треба да се земаат предвид кога се врши евалуација на перформансите на метахевристичките алгоритми;

- метахевристики коишто се базирани на популација од решенија т.е. популациони метахевристики (анг. population-based) и метахевристики што користат само едно потенцијално решение (анг. single-solution based). Од друга страна, популационата метахевристика, во која спаѓа на пример оптимизацијата со рој на честици (анг. Particle Swarm Optimization - PSO) и EA, врши пребарување, притоа користејќи популација од потенцијални решенија за проблемот. Овие две групи имаат комплементарни карактеристики: метахевристика којашто користи едно потенцијално решение главно користи и интензификација на пребарувачкиот простор, додека пак популационата метахевристика е ориентирана кон диверзификација. Поради комплементарните карактеристики, овие метахевристички алгоритми често се користат заедно со што се формира хибриден алгоритам;
- метахевристики што користат меморија, т.е. коишто имаат можност за паметење на претходните решенија (анг. memory usage methods) и оние коишто не користат меморија, т.е. немаат можност за паметење на претходните решенија (анг. memoryless methods). Алгоритмите што не користат меморија, немаат можност за динамично извлекување информации во текот на процесот на пребарување. Еден од претставниците на овој тип е претходно спомената метахевристичка метода SA. Од друга страна, многу алгоритми користат систем за online екстракција на меморија во текот на пребарувањето, како што е на пример краткотрајна и долготрајна меморија којашто поседува единки на TS;
- метахевристики инспирирани од природата т.е. природно инспирирани метахевристички алгоритми (анг. nature-inspired) и на оние кои не се инспирирани од природата (non-nature-inspired). Создавањето многу метахевристички методи е инспирирано од природните процеси, како што се на пример EA и вештачките имуни системи (анг. Artificial Immune System – AIS). Исто така, многу организми во природата биле инспирирација за развој на овие методи, како што се на пример колониите (роеви) мравки, пчели, јата птици, риби итн. Освен наведените, во литературата постои и метахевристика којашто е базирана на физичките процеси, како што е SA;

Освен наведените поделби, важно е да се споменат уште две класификации. Според едната поделба, метахевристичката се дели на алгоритми што користат само една структура на околината и на оние коишто користат збир структури на околината. Оптимизационите методи главно користи една структура на околината, но постојат и алгоритми, како што е методот на променливи околинати што користи збир структури на околина. Ваквите методи се базирани на систематска промена на околината којашто вклучува и локално пребарување.

Според другиот тип поделба, метахевристичките методи можат да бидат конструктивни, подобрени и хибридни. Конструктивните алгоритми го формираат своето решение по принципот “чекор по чекор”. Хибридните алгоритми се имплементации што настанале со комбинација на повеќе алгоритми.

Во двете наредни потпоглавја е даден детален приказ на метахевристичките алгоритми коишто се или не се инспирирани од природата.

### 5.3.3 Метахевристички алгоритми што не се инспирирани од природата

Метахевристичките алгоритми се сложени системи коишто обично се состојат од популациони хевристики комбинирани со други техники. Во оваа група алгоритми може да се започне со методот на Монте Карло, па до LS. Како едни од претставниците на метахевристичките алгоритми коишто не се инспирирани од природата се табу пребарувањето (анг. Tabu Search – TS) и диференцијалната еволуција (анг. Differential Evolution – DE).

Методот на Монте Карло (анг. Monte Carlo) најчесто се споменува во литературата како еден од наједноставните оптимизациони методи. Тој припаѓа во групата стохастички алгоритми, бидејќи во процесот на пребарување користи одредено ниво на случајност. Методот на Монте Карло работи на тој начин што од низа потенцијални решенија случајно избира едно решение. Притоа, проверува дали квалитетот на случајно одбраното решение е подобар од дотогашното најдобро избрано решение, а доколку е така, тогаш тоа решение се чува и се избира ново тест решение. Овој процес се повторува сè додека не биде исполнет некој однапред дефиниран критериум за запирање на алгоритмот [121]. Најчесто користени критериуми за запирање на алгоритмот се број на обиди за подобрување на решението, т.е. број на итерации, како и број на обиди да се подобри моменталното најдобро решение. Кај Монте Карло методот, веројатноста да се најде оптималното решение се зголемува со зголемувањето на бројот на тестирани решенија.

Ефикасноста на методот на Монте Карло најдобро може да се илустрира на следниот тривијален проблем. Нека е дадено множество од  $n$  броеви и потребно е да се пронајде елементот кој припаѓа на горната половина од множеството. Првата идеја е да се изврши комбинација на  $n/2$  елементи и најголемиот број меѓу нив сигурно ќе припаѓа на горната половина од множеството. Потоа, потребно е да се извршат  $n/2$  споредби. Методот на Монте Карло пристапува кон овој проблем така што на случаен начин избира еден елемент при што проверува дали е поголем од веќе пронајдениот максимум, и доколку е поголем, тогаш тој елемент се зема за нов максимум. Се поставува прашањето колкава е веројатноста после  $i$  чекори да не е пронајден елемент којшто припаѓа на горната половина. Веројатноста првиот избран елемент да не припаѓа на горната половина е 0,5, а после вториот обид таа веројатност изнесува  $0,5^2$  итн. Според тоа, јасно е дека после  $i$  чекори, веројатноста да не биде пронајден елемент кој припаѓа на горната половина, изнесува  $0,5^i$ .

Врз основа на наведениот пример погоре, може да се забележи дека со методот на Монте Карло решенијата се добиваат споро, а за генерирање решенија со висок квалитет, потребно е да се тестираат голем број потенцијални решенија. Токму поради овие причини, методот на Монте Карло обично не се користи посебно, туку се комбинира со LS, или со некои други механизми што ја намалуваат случајноста при изборот на следното решение што ќе биде тестирано.

Поедноставениот псевдо-код на методот на Монте Карло за проблем за минимизација, е прикажан алгоритам 1.

Методот на Монте Карло има голем број практични примени коишто ја опфаќаат речиси секоја област. Така на пример, оваа техника се користи во анализата на неизвесноста и осетливоста [122].

---

## Алгоритам 1 Псевдо-код на методот Монте Карло

---

1. Иницијализација. Избери почетно решение  $x$  и постави  $x_{opt} = x$  и  $f_{opt} = f(x)$
  2. **while** не е задоволен критериумот за запирање **do**
    - a. Избери случајно решение  $x'$  во просторот на допустливи решенија  $X$
    - b. Проверка на решението
    - c. **if**  $f(x') < f_{opt}$  **then**
      - i.  $x_{opt} = x'; f_{opt} = f(x')$
    - d. **end**
  3. **end**
- 

*Локално пребарување* (анг. Local Search - LS) е метод за општа намена којшто се користи за подобрување на веќе пронајдените решенија. Овој метод е најефикасен кога се бара решение коешто има најголема вредност за некој критериум од сите потенцијални решенија.

LS се движи од едно до друго решение сè додека не се пронајде оптимално решение или сè додека не е задоволен некој друг критериум за запирање на алгоритмот. Со други зборови, LS е итеративен процес, во кој се поаѓа од некое почетно решение, а притоа потрагата се насочува кон некое ново решение во неговата околина коешто е потенцијално подобро. Околината се дефинира во зависност од проблемот што се решава. Во повеќето случаи, околината опфаќа повеќе од едно решение, па е потребно да се дефинира и начинот на кој се избира решението во околината на постоечкото. Најстандардниот начин за селекција е методот на искачување на ридот (анг. hill climbing). Со примената на овој метод, пребарувањето се насочува кон решение од соседството на постоечкото решение, коешто има максимална вредност на одреден атрибут со очекување дека новото решение ќе биде подобро од тековното.

Суштински, недостатокот на LS е во тоа што алгоритмот се запира тогаш кога ќе најде на првиот локален минимум, кој не значи дека е и глобален оптимум. Поради тоа, LS и сличните методи најчесто се користат во комбинација со другите алгоритми. Така на пример, решението што е пронајдено од страна на Greedy algorithm, се користи како почетен чекор за LS или случајно избраното решение со методот на Монте Карло се прогласува за “корен” на LS итн.

Кога станува збор за LS, треба да се спомне и методот на повеќе-стартно локално пребарување (eng. multi-start local search – MLS). Овој метод го избегнува заглавувањето во локален минимум, така што пребарувањето во секоја итерација почнува од ново почетно решение. На овој начин, во текот на извршување на алгоритмот се генерираат многу локални минимума што меѓусебно се споредуваат и најдобриот меѓу нив се прогласува за конечно решение.

### 5.3.3.1 Tabu Search

Табу пребарувањето (анг. Tabu Search – TS) е математички оптимизационен метод којшто припаѓа во категоријата LS техники. Оваа техника прв ја дефинирал Fred W. Glover 1986 година [123], а методот е формализиран дури во 1989 година.

Накратко кажано, TS ја зголемува ефикасноста на LS со употреба на мемориска структура. Концептот на меморија се сведува на тоа кога ќе се пронајде потенцијалното

решение, тоа да се означува како „tabu“ и алгоритмот во понатамошниот процес на пребарување веќе не го „посетува“ тоа решение.

Како што е веќе споменато, LS алгоритмите понекогаш заглавуваат во локалните оптимуми. TS значајно ги подобрува перформансите на LS по пат на мемориска структура што го опишува веќе пронајденото решение, или со помош на сет од правила дадени од страна на корисникот. Доколку алгоритмот веќе го испитал одреденото потенцијално решение на проблемот во близок временски интервал, или ако во формулацијата на проблемот се користи предефинирано правило што даденото решение не го задоволува, тогаш тоа решение се означува како „tabu“. TS ја памети листата од последните  $n$  tabu решенија. Во текот на процесот на пребарување, алгоритмот го избира најдоброто соседно моментално решение што не се наоѓа во листата на tabu решенија, дури и во случај соседното решение да е полошо од моментално најдоброто решение. На овој начин се елиминира основниот недостаток на методот LS, односно заглавувањето во субоптималните региони.

Tabu листите складираат податоци за движењето, односно динамиката на добиените решенија за неколку последни итерации. Овие информации се користат за избор на наредното решение, но и за модификација на дефинирањето на околината, така што некое од недопустливите решенија би било отстрането од популацијата. Врз основа на фактот дека структурата на околина  $N(x)$  на решенијата  $x$  се менува од итерација во итерација, TS припаѓа во групата на техники со динамичко пребарување на околината.

### 5.3.3.2 Differential Evolution

Диференцијалната еволуција (ang. Differential Evolution – DE) е една од често користените метахевристички методи за решавање проблеми со глобална оптимизација. Овој алгоритам којшто се покажал ефикасен во решавањето многу проблеми, бил предложен од страна на Storn и Price во 1997 година [124].

Како и во случаите на поголемиот дел од останатите популациони метахевристички алгоритми, почетната случајна популација се генерира во фазата на иницијализација. Во секоја генерација на извршување, се креираат нови индивидуи т.е. единки со помош на операторите вкрстување и мутација. Притоа се пресметува квалитетот т.е. fitness функцијата на новите единки (експериментални единки) и се споредуваат со квалитетот т.е. fitness функциите на старите единки (целни единки). Врз основа на резултатот на овој процес, подобрите единки се зачувуваат и се пренесуваат во следната генерација. Експерименталните единки се генерираат со вкрстување на целните единки со единките коишто настанале со примена на операторот мутација (мутирани единки).

Price и останатите предложиле ралзични варијанти на DE[125], кои конвенционално се нарекуват  $DE/x/y/z$ , каде што  $x$  е низа којашто го означува основниот вектор (на пример вектор којшто ќе биде модифициран, без разлика дали е случаен или најдобар во популацијата),  $y$  е број на различни вектори со помош на кои ќе се врши петурбација на основниот вектор и  $z$  ја означува шемата на вкрстување којашто може да биде биномна или експоненцијална. Класичната верзија на DE алгоритмот има ознака  $DE/rand/1/bi$ .

Мутацијата во DE алгоритмот се изведува со пресметка на разликата на векторите на случајно избраните единки од иста популација. Постојат повеќе начини на генерирање мутирани единки. Со примена на најчесто користената стратегија на



мутација  $DE/rand/1/bi$ , експерименталниот вектор  $\vec{V}_{i,g}$  се генерира со додавање пондериран вектор на разлика  $F(\vec{X}_{r2,g} - \vec{X}_{r3,g})$  на случајно избраниот основен вектор  $\vec{X}_{r1,g}$ . За секој вектор со целни единки  $\vec{X}_{r1,g}, i = 1, \dots, N$  каде  $g$  ја означува моменталната генерација, а  $N$  бројот на единки во популацијата, мутант векторот т.е. векторот со мутирани единки се генерира со примена на следната формула [126]:

$$\vec{V}_{i,g} = \vec{X}_{r1,g} + F(\vec{X}_{r2,g} - \vec{X}_{r3,g}) \quad (5.21)$$

каде  $r1, r2$  и  $r3$  се случајно избрани индекси од интервалот  $[1, N]$  коишто се различни од моменталните индекси  $i$ .  $F$  е фактор на скалирање од интервалот  $[0, 1]$ .

Експерименталниот вектор  $\vec{U}_{i,g}$  се креира со примена на операторот на вкрстување којшто ги комбинира компонентите на  $i$ -тиот вектор  $\vec{X}_{i,g}$  и соодветниот вектор  $\vec{V}_{i,g}$  [126]:

$$U_{i,j,g} = \begin{cases} V_{i,j,g}, & \text{ако } \theta \leq CR \text{ или } j = j_{rand} \\ X_{i,j,g}, & \text{во спротивен случај} \end{cases} \quad (5.22)$$

каде  $CR$  е фактор на вкрстување чијашто вредност е од интервалот  $[0, 1]$  и ја претставува веројатноста за креирање нови вредности на варијаблите на експерименталниот вектор врз основа на мутант векторот, додека индексот  $j_{rand}$  е случајно избрана дискретна вредност од интервалот  $[1, N]$ . Параметарот  $\theta$  е случаен број помеѓу 0 и 1,  $j = 1, \dots, D$  каде што  $D$  е број на параметри на проблемот.

Конечно, за да се одлучи дали новото решение се пренесува во следната генерација  $g+1$ , квалитетот на експерименталниот вектор  $\vec{U}_{i,g}$  се спореди со квалитетот на целниот вектор  $\vec{X}_{i,g}$ :

$$\vec{X}_{i,g+1} = \begin{cases} \vec{U}_{i,g}, & \text{ако } f(\vec{U}_{i,g}) < f(\vec{X}_{i,g}) \\ \vec{X}_{i,g}, & \text{во спротивен случај} \end{cases} \quad (5.23)$$

Главна предност на DE е тоа што користи мал број контролни параметри. Недостатокот е спората конвергенција и стагнацијата на популацијата.

### 5.3.3.3 Други претставници на метахевристичката што не се инспирирани од природата

Освен наведените алгоритми, постојат и многу други алгоритми што не се инспирирани од природата. Од останатите претставници на оваа фамилија може да се споменат методот на променлив спуст (анг. Variable Neighborhood Descent – VND) [127], методот на променливи соседства (анг. Variable Neighborhood Search – VNS) [127] и Scatter Search [128].

Метахевристичкиот алгоритам VNS го предложиле Mladenovic и Hansen [127]. Овој алгоритам врши процес на пребарување на начин што ги истражува соседните решенија коишто се од динамична и променлива природа. Овој метод е ефикасен во случаите кога соседните решенија се комплементарни, на пример ако локалниот оптимум на соседството  $N_i$  не е локален оптимум на соседството  $N_j$ . VND е детерминистичка верзија на VNS.

За подобро да се разбере методот VNS, неговиот псевдо-код е прикажан во Алгоритам 2.

---

### Алгоритам 2 Псевдо-код на методот VNS

---

1. Избери множество структури на соседства  $N_n$ ,  $n = 1, \dots, n_{\max}$
  2. Избери случајно почетно решение  $s$
  3. **while** не е задоволен критериумот за запирање **do**
    - a.  $n \leftarrow 1$
    - b. **while**  $n < n_{\max}$  **do**
      - i. Избери случајно решение  $s'$  во  $n$ -тото соседство  $N_n(s)$  од  $s$
      - ii. Примени локална претрага како би се дошло од решението  $s'$  до решението  $s''$
      - iii. **if**  $s''$  е подобро од  $s$  **then**
        1.  $s \leftarrow s''$
        2.  $n \leftarrow 1$
      - iv. **else**
        1.  $n \leftarrow n + 1$
      - v. **end**
    - c. **end**
  4. **end**
- 

#### 5.3.4 Метакхевристички алгоритми што се инспирирани од природата

Метакхевристичките алгоритми коишто се инспирирани од природата (анг. nature-inspired metaheuristic algorithms, bio-inspired metaheuristic algorithms) припаѓаат во групата на метакхевристички оптимизациони методи што ги симулираат природните процеси и системи кога се извршува пребарувањето на просторот на потенцијални решенија. Во оваа група на метакхевристички алгоритми припаѓаат две главни фамилии, односно еволуциски алгоритми (анг. Evolutionary Algorithms – EA) и метакхевристички алгоритми базирани на интелигенцијата на роевите (анг. Swarm Intelligence Algorithms – SIA).

И двете групи алгоритми се базираат на слични принципи и концепти. Меѓутоа, помеѓу нив постои значајна разлика и една група не е специјален случај на друга. Поради тоа што двете групи алгоритми имаат свои карактеристични предности и недостатоци, тие често се користат кооперативно преку т.н. хибриден пристап, кој врши усвојување на предности од едните, со истовремена елиминација на недостатоците од другите метакхевристички алгоритми.

Теројјата на еволуција на Charles Darwin и законите за наследување на Gregor Mendel претставуваат темел на развојот на EA. Теоретската основа за развој на овие алгоритми е прикажана во Дарвиновата книга “Настанување на видот по пат на природно избирање” [129].

Еволуцијата е метод на пребарување голем број можности за потенцијални решенија на проблемите. Меѓутоа, самиот еволуциски процес е во суштина релативно едноставен, бидејќи видовите брзо се развиваат и еволуираат со примена на прости правила по пат на вкрстување, варијација и случајна мутација на генетскиот материјал. Со ова се применува и процесот на селекција коишто ги избира само оние единки коишто се најдобро приспособени на опкружувањето во коешто егзистираат. Прилагодувањето се мери на различни начини, како што се променливите временски

услови или адаптацијата на други единки во опкружувањето. Критериумите за мерење на прилагоденоста, т.е. квалитетот на единката, перманентно се менуваат со развојот на единките, така што на еволуцијата може да се гледа и како на континуирано барање на нови можности. Единките коишто успеваат да опстанат, го пропагираат својот генетски материјал во следната генерација.

Darvin во својата оригинална работа го истакнал следното [129]: сите видови се многу плодни и потомците секогаш имаат повеќе отколку што е потребно; големината на популацијата е речиси секогаш иста; количината на храна којашто е на располагање на единките во популацијата е ограничена; кај типот единки коишто сексуално се репродуцираат, постои варијација на генетски материјал и значаен процент варијација да се пренесе во наредните генерации по пат на механизмот на наследување.

Врз основа на Дарвиновата теорија следува дека во секоја популација постои борба за преживување и опстанок поради големиот број на потомци и ограничени ресурси како што се вода, храна и засолниште. Само најдобрите единки добиваат шанса да се репродуцираат и да го пренесат својот генетски материјал во следната генерација.

Инспирирани од процесот на еволуција, ЕА припаѓаат во групата на популационо-итеративни метахевристички алгоритми, коишто процесот на пребарување го вршат со последователни избори на подобри решенија што се генерираат со помош на операторите вкрстување (анг. crossover - X) и мутација (анг. mutation - M). Со вкрстување се комбинираат решенија (единки родители), при што се добиваат нови потенцијално подобри решенија (единки потомци/деца). Мутацијата е случајна модификација на новокреираната единка. Во контекст на еволуцијата, подобноста т.е. квалитетот (анг. fitness) на единките најчесто се дефинира како веројатност дека новонастанатиот потомок ќе живее доволно долго за да се репродуцира (анг. viability) или се одредува според бројот на деца коишто ќе ги имаат (анг. fertility).

Псевдо-кодот на еден основен ЕА е прикажан во Алгоритам 3.

---

### Алгоритам 3 Псевдо-код на основен ЕА

---

1. Почеток, иницијализација
  2. **while** не е задоволен условот за запирање на алгоритмот
    - a. Избор на родители за вкрстување
    - b. Вкрстување на парови родители и генерирање на деца
    - c. Мутација на деца
    - d. Евалуација на квалитетот (fitness) на децата
    - e. Процес на селекција на единките за учество во следната генерација
  3. **end**
- 

Генетскиот алгоритам (анг. Genetic Algorithm - GA) е најстар претставник на метахевристичките ЕА.

#### 5.3.4.1 Генетски алгоритам

GA е најпознатиот претставник на фамилијата ЕА и како таков, најмногу придонел за развојот на ЕА. За создавањето на GA заслужен е Holland, кој теоретската основа за развојот на GA ја приложил во својата книга “Адаптација во природните и вештачките системи” (анг. Adaptation in Natural and Artificial Systems). Главни карактеристики на GA се: кодирање на потенцијалното решение на проблемот со помош на бинарните цифри; операторите за вкрстување се извршуваат над паровите единки, а операторот за мутација

се користи за случајна модификација на решенијата. Потенцијалните решенија на проблемите во контекст на GA се нарекуваат хромозоми, а нивните делови се нарекуваат гени.

GA припаѓаат во групата стохастички методи за глобално пребарување што го симулираат процесот на биолошка еволуција. Основната конструкција е популацијата на единки т.е. хромозоми којашто најчесто се состои од 10 до 200 хромозоми. За да се реши проблемот со помош на GA, потенцијалните решенија (хромозоми) треба да се кодираат. Во ова се крие еден од најголемите предизвици кај GA, бидејќи не постои универзален начин на кодирање, туку тој зависи од проблемот до проблем.

На секој хромозом се доделува одреден квалитет, којшто се пресметува со помош на фитнес функција (анг. fitness function). Во текот на процесот на пребарување, GA континуирано врши подобрување на фитнес функцијата на секој хромозом во популацијата и средната вредност на фитнес функцијата на целата популација и на тој начин процесот на пребарување конвергира кон глобален оптимум. Конвергенцијата се постигнува со последователна примена на генетските оператори: селекција, вкрстување, мутација. Со процесот на селекција се фаворизираат хромозомите коишто имаат натпросечна т.е. многу добра вредност на фитнес функцијата, како и нивните делови (гени), коишто на тој начин добиваат поголема шанса да преживеат и да учествуваат како родители во формирањето на следната генерација. Единките коишто се послабо прилагодени, односно со полоша вредност на фитнес функцијата, имаат помали шанси за репродукција и постепено изумираат. Основната импликација на овој процес е новите единки подобро да се прилагодуваат на околината отколку оние од кои настанале, како што е случајот за биолошките системи.

Наједноставниот пример е основен GA. Неговите основни карактеристики се пропорционална, т.е. рулет селекција (анг. proportional, roulette selection), вкрстување во точка, како и основна мутација.

Псевдо-кодот на еден основен GA е прикажан во Алгоритам 4. Секоја итерација на GA се нарекува генерација. Во најголем број случаи GA се извршува од 50 до 500, или повеќе генерации. На крајот од секоја генерација во популацијата се наоѓа една или повеќе единки коишто имаат многу добра вредност на фитнес функцијата. Во овој процес големо влијание има случајноста, па затоа и резултатите при различно извршување на GA можат значително да се разликуваат. Поради тоа, резултатите добиени од GA се прикажуваат статистички, како просечна вредност од повеќе извршувања на GA за ист тип проблем и со исто подесување на параметрите. Вредноста на параметрите како што се големината на популацијата  $n$ , веројатноста за вкрстување и мутација  $p_c$  и  $p_m$  респективно, влијаат врз ефикасноста и ефективноста на GA, а со тоа и на добивањето на резултатите.

---

**Алгоритам 4 Псевдо-код на основен GA**


---

1. Иницијализација, генерирање случајна популација од хромозоми со број на битови  $n$  и должина  $l$
  2. **while** не се изврши максималниот број на генерации **do**
    - a. Пресметка на вредноста на фитнес функцијата  $F(x)$  на секој хромозом во популацијата
    - b. **while** не се креираат  $n$  деца **do**
      - i. Избор на пар хромозоми за родители од тековната популација
      - ii. Со веројатност  $p_c$  избраните хромозоми (родители) се вкрстуваат и создаваат два нови хромозоми (две деца)
      - iii. Мутација на новите хромозоми (деца)
    - c. **end**
    - d. Замена на тековната популација со нова популација
  3. **end**
- 

### 5.3.4.2 Симулирано калење

Симулираното калење (анг. Simulated Annealing – SA) е метахевристички алгоритам инспириран од природата за решавање проблеми за глобална оптимизација. SA го симулира физичкиот процес на калење на металот, т.е. процесот на загревање и контролирано ладење на металот во состојба на кристална решетка со најмала енергија и голема величина на кристал. Цврстината на кристалната решетка одговара на критериумската функција што се оптимизира, а начинот на ладење го имитира процесот на пребарување. Во текот на процесот на калење, потребно е внимателно да се одреди температурата и степенот на замрзнување (анг. cooling rate) којашто во литературата често се среќава под името распоред на калење.

Првата примена на SA ја прикажале Kirkpatrick, Gelat и Vecchi во 1983 година [130]. Оттогаш во литературата може да се сретнат голем број примери за примената на овој метод. За разлика од некои други, особено детерминистичките оптимизациони методи, SA има голема предност затоа што го избегнува заглавувањето во локален минимум. Поточно, докажано е дека SA конвергира кон глобалниот оптимум, доколку во процесот на пребарување се користи доволен степен случајност во комбинација со бавното ладење.

SA може да се спореди со фрлањето топка. Кога ќе се фрли топката, таа неколкупати ќе отскокне сè додека не ја изгуби енергијата и на крајот ќе се “смири” во некој од локалните минимуми. Ако топката има доволно енергија да може да отскокне повеќепати, со постепена загуба на енергијата, на крајот ќе се „смири“ во точка којашто претставува глобален оптимум.

Главната идеја на SA е да се користи случајно пребарување и освен прифаќањето променливи решенија што ја подобруваат критериумската функција, да се прифаќаат и решенија што не се идеални. Така на пример, при случај на минимизација, секоја промена на решенијата што ја намалува вредноста на критериумската функција  $f$  ќе биде прифатена, но исто така ќе биде прифатена со одредена веројатност  $p$  и некоја промена што ќе ја зголеми вредноста на критериумската функција  $f$ . Оваа веројатност, што во литературата се нарекува транзициона веројатност, се одредува на следниот начин:

$$p(i) = e^{-\frac{\delta E}{kT}} \quad (5.24)$$

каде што  $k$  е Болцманова константа, а  $T$  е температура што го контролира процесот на калење, додека  $\delta E$  претставува промена во енергетското ниво. Вака дефинираната веројатност на транзиција се базира на Болцмановата дистрибуција од физиката. Наједноставниот начин да се поврзе  $\delta E$  со промената на вредноста на критериумската функција  $\delta f$ , е прикажан со следниот израз:

$$\delta E = \gamma \delta f \quad (5.25)$$

каде што  $\gamma$  е реална константа. Заради едноставност, може да се усвои дека  $k = 1$  и  $\gamma = 1$ . Во овој случај, равенката со којашто се пресметува веројатноста  $p$  го добива следниот облик:

$$p(\delta f, T) = e^{-\frac{\delta f}{T}} \quad (5.26)$$

Без оглед на тоа дали промената на решенија се прифаќа или не, обично се користи псевдо-случаен број  $r$  како гранична вредност на прифаќање на промената, така што, доколку е  $p > r$  или [131]:

$$p = e^{-\frac{\delta f}{T}} > r \quad (5.27)$$

решението ќе биде прифатено.

Метахевристичкиот алгоритам SA може да се прикаже со едноставен псевдо-код кој е прикажан во алгоритам 5 [131].

---

#### Алгоритам 5 Псевдо-код на SA

---

1. Почеток
  2. Критериумска функција  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_p)^T$
  3. Иницијализација на почетната температура  $T_0$  и поставување  $x^0$  за најдобро решение
  4. Поставување конечна температура  $T_f$  и максимален број итерации  $N$
  5. Дефинирање на распоредот на ладење  $T \rightarrow \alpha T, (0 < \alpha < 1)$
  6. **while**  $T > T_f$  и  $n < N$  **do**
    - a. Поместување на решението на случајна нова локација  $x_{n+1} = x_n + rnd$
    - b. Пресметување  $\delta f = f_{n+1}(x_{n+1}) - f_n(x_n)$
    - c. Прифаќање на новото решение ако е подобро од старото
    - d. Доколку новото решение не е подобро, тогаш генерирај случаен број  $r$
    - e. Прифати го новото решение ако е задоволен условот (5.27)
    - f. Ажурирање на позицијата на најдоброто решение  $x_*$  и  $f_*$
  7. **end**
- 

#### 5.3.4.3 Интелигенција на роеви

Метахевристичките алгоритми што се базираат на интелигенцијата на роевите, се понови претставници на алгоритмите коишто се инспирирани од природата, поради фактот дека може да генерираат брзи, евтини и квалитетни решенија за тешки оптимизациони проблеми. Областа на алгоритмите на роеви е жива и динамична област, со што во прилог се и голем број објавени трудови во големите светски списанија.

Предмет на истражување на оваа докторска дисертација е GA, па затоа метахевристичките алгоритми што се базираат на интелигенцијата на роевите нема да бидат предмет на понатамошни разгледувања и понатамошна анализа.

# СОВРЕМЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ

---

---

Поглавје

6



## 6 СОВРЕМЕН ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТАМ

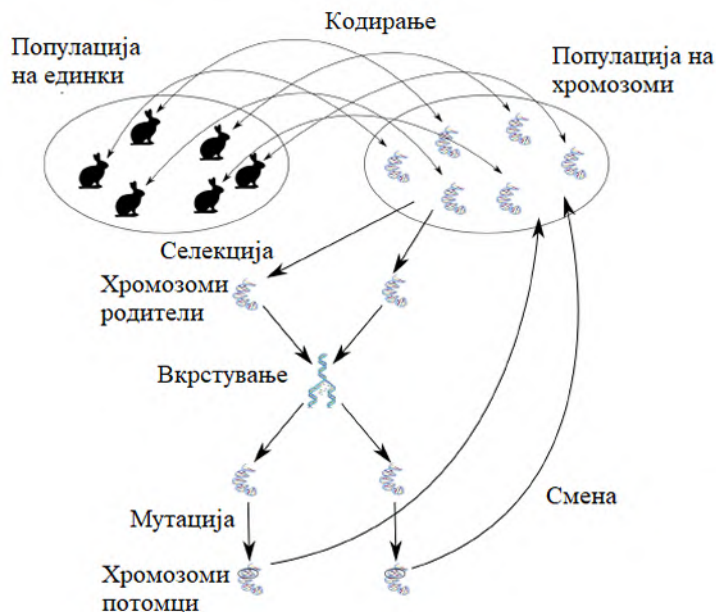
### 6.1 ВОВЕД

Повеќето биолози веруваат дека главниот двигател на природната еволуција е Дарвиновиот принцип за опстанок на најспособните. Во повеќето случаи, во природата постојат следните два принципи:

- Доколку со мешање на гените се добие единка којашто е над просечните, таа ќе опстане подолго од просечните единки и ќе има повеќе можности да произведе повеќе потомци со слични особини во однос на просечните единки.
- Од друга страна ако се направи единка којашто е под просекот, таа нема долго да опстане во природата и ќе биде елиминирана од популацијата.

Реномираниот биолог Ричард Докинс објаснил многу еволуциони причини благодарение на Дарвиновиот принцип за опстанок на најспособните. Тој истакнува дека високите дрвја на планините во почетокот на еволуцијата биле високи само едно стапало. Доколку со генетската комбинација се добива потомок кој е поголем од останатите дрвја, тој потомок ќе добива повеќе сонце и дожд и ќе биде попримамлив за инсекти во период на опрашување на цветовите во споредба со стеблата во околината. Со дополнителни поволности, овој потомок ќе живее подолго и ќе произведува повеќе високи потомци во однос на другите стебла. Набрзо стеблата со овие гени ќе заземат поголем дел од планините и ќе продолжат да се борат со останатите стебла за преостанатиот простор. Доколку се создаде потомок кој е помал од останатите стебла, шансите за задоволување на основните животни потреби ќе бидат намалени од страна на неговите соседи. Така, ваквите стебла нема да можат долго да опстанат. Во генетскиот алгоритам, особините на природната еволуција се воведени низ неговите операции.

Позитивната страна на алгоритмите коишто работат со популацијата е што можат да ги форсираат добрите решенија, а негативните да ги отфрлаат. Меѓутоа, може да се постави прашање дали постои врска помеѓу генетскиот алгоритам и природната еволуција, односно дали природата се обидува да максимизира некаква корисна функција. Доколку подлабоко се навлезе во оваа тематика, тешко може да се замисли бројот на таквите функции што природата се обидува да ги максимизира. Некои од нив се продолжен животен век на видовите, квалитет на живот на поединечните видови, физички раст на единките и многу други. Меѓутоа, ни една од овие функции не е стационарна, туку зависи од еволуцијата на другите видови. На пример, доколку гореспомнатата теорија се примени на зајаци, брзите зајаци ќе му побегнат на грабливецот. Гледано од аспект на грабливците, на пример лисици, доколку не се развиваат (не ја зголемуваат својата брзина) ќе можат да ги фаќаат само бавните зајаци кои ќе бидат сè помалку. Имајќи го предвид ова, лесно е да се разбере дека во природата се одвиваат многу оптимизациони процеси коишто се повеќе комплицирани од проблемите што човекот се обидува да ги реши. Генетскиот алгоритам е само апстракција на сложената природна генетика и процесот на природна селекција. Иако GA е само едноставна апстракција, тој е многу брз и може да се примени за решавање на многу оптимизациони проблеми [132].



Слика 6.1 Основна идеја на ГА

## 6.2 КОДИРАЊЕ

Кај бинарното кодирање секоја променлива се претставува со бинарна низа со фиксна должина. На пример, следната низа претставува проблем со  $n$  променливи:

$$\underbrace{1101101001110010}_{x_1} \dots \underbrace{1001}_{x_n} \quad (6.1)$$

Според изразот (5.28),  $i$ -тата променлива е кодирана со бинарна низа со должина  $l_i$ , што значи дека вкупниот број вредности што оваа променлива може да го зеде е  $2^{l_i}$ . Долната граница  $x_{\min}$  е претставена со бинарната низа (00...0), додека горната граница  $x_{\max}$  е претставена со следната бинарна низа (11...1). Сите други комбинации на низата  $s_i$  се декодираат на следниот начин [133, 134]:

$$x_i = x_i^{\min} + \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{2^{l_i} - 1} DV(s_i) \quad (6.2)$$

каде што  $DV(s_i)$  е декодирана вредност на низата. Декодираната вредност на поднизата  $S \equiv (S_{l-1} S_{l-2} \dots S_2 S_1 S_0)$  е:

$$DV(S) = \sum_{j=0}^{l-1} 2^j S_j \quad (6.3)$$

Вкупната должина на една низа (којашто се нарекува хромозом) се одредува со помош на должините на сите поднизи, т.е. е еднаква на нивната сума. Должината на поднизата е дефинирана со посакуваната прецизност на променливата. Должината на секоја подниза се пресметува на следниот начин:

$$l_i = \log_2 \left( \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{\varepsilon_i} \right) \quad (6.4)$$

каде што  $\varepsilon_i$  е посакуваната децимална прецизност на променливата  $i$ .

Во повеќето истражувања се применувало кодирање на потенцијалните решенија во бинарни стрингови. Иако овој начин на кодирање е применет во првичниот GA и е многу едноставен, сепак перформансите на GA со бинарно кодирање не се најдобри во секоја примена. Ова претставува причина за користење на други начини на кодирање, од кои најмногу применето е реалното кодирање на потенцијалните решенија во вектор со реални броеви. Michalewicz, Back, Davis и други, покажале дека за повеќето случаи кај коишто се јавуваат реални броеви, перформансите на реално-кодираниот GA повеќекратно ги надминуваат перформансите на бинарно-кодираниот GA. Кај реално-кодираниот GA важи  $A = R$ , односно како вредност може да се појави кој било реален број [132 - 134].

Наједноставен пристап е за пресликувањето  $C : x \leftrightarrow a$  користи идентитет, односно директно да се кодираат компонентите  $x$  на векторот  $x$ . Во таков случај  $x = a$ .

Користењето реално кодирање на броевите бара и дефинирање на адекватни оператори за вкрстување и мутација. Во продолжение ќе бидат претставени најчесто користените, но и новопредложените оператори за овој модел на GA, кој е предмет на истражување на оваа докторска дисертација.

### 6.3 ПОЧЕТНА ПОПУЛАЦИЈА

За да се започне со работа потребно е да се генерира почетната популација. Почетната популација се состои од  $N$  низи, каде што секоја низа претставува потенцијално решение на набљудуваниот проблем. Вкупниот број елементи на популацијата,  $N$ , не се менува со текот на итерациите. На секоја позиција на низата  $l_i (i = 1, \dots, n)$  може да се додели 0 или 1 со еднаква веројатност. По креирање на низата, можно е со одвојување на првите  $l_1$  битови од целата низа да се пресмета вредноста на променливата  $x_1$  со помош на изразот (5.29). На ист начин може да се пресметат сите  $n$  вредности на независните (управувачките) променливи на набљудуваниот оптимизационен проблем. Кога се познати сите управувачки променливи може да се пресмета вредноста на критериумската функција  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Доколку некој од членовите на популацијата т.е. некоја единка го наруши кое било релевантно ограничување на оптимизациониот проблем, тогаш на таквата единка ѝ се доделува голем пенализационен фактор, односно се отфрла во наредната генерација. Ваков пристап владее и кај животните. Како на пример, некој животински вид ги отфрла младенчињата коишто се родени со некоја мана [132].

### 6.4 ФИТНЕС ФУНКЦИЈА

Ако после процесот на декодирање, кој е веќе опишан, се познати вредностите на сите променливи, може да се пресмета вредноста на критериумската функција  $f(x_1, \dots, x_n)$  [132, 134]. На секој хромозом, без разлика дали настанал како последица на оператор на генетскиот алгоритам или во почетната популација, треба да се одреди вредноста на фитнес функцијата што е поврзана со вредноста на критериумската функција на набљудуваниот хромозом. Кај оптимизационите проблеми кај коишто се бара максимумот, фитнес вредноста на хромозомот се изедначува со истите вредности на оптимизационата функција. Додека кај проблемот за минимизирање се користи следниот пристап:

$$F = \frac{1}{1 + f(x_1, \dots, x_n)} \quad (6.5)$$

Во изразот (5.32) наместо 1 може да се користи кој било друг број, а неговата улога е избегнување на сингуларитет кога  $f \rightarrow 0$ .

#### 6.4.1 Релативна фитнес функција

Еден од начините за спречување на GA да заглави во локален оптимум, е примена на т.н. релативна фитнес функција (анг. relative fitness function) [135, 136]. Во таков случај, релативната фитнес функција на секој хромозом се пресметува според следниот израз:

$$F_{rel}(x_i) = \frac{F(x_i) - F_{min}}{F_{max} - F_{min}} \quad (6.6)$$

каде што

$F(x_i)$  - фитнес функција на хромозомот  $i$

$F_{min}$  - минимална вредност на фитнес функцијата на тековната популација

$F_{max}$  - максимална вредност на фитнес функцијата на тековната популација

Иако ваквата формулација на фитнес функцијата обезбедува секој хромозом да има можност да биде селектиран за вкрстување, зависно од вредноста на неговата фитнес функција, таа не ги зема предвид негативните вредности на фитнес функциите.

#### 6.4.2 Линеарно скалирање на фитнес функцијата

Линеарното скалирање исто така се користи со цел дефинирање на фитнес функцијата, како и спречување неколку добри хромозоми со нешто поголема вредност на фитнес функцијата, да бидат многукратно повеќе селектирани споредбено со останатите. Фитнес функцијата може линеарно да се скалира со примена на следниот израз [71, 134, 135]:

$$\begin{aligned} F_s(x_i) &= a_s F(x_i) + b_s, \\ a_s &= (sp - 1) F_{av} / (F_{max} - F_{min}), \\ b_s &= (1 - a_s) F_{av}, \end{aligned} \quad (6.7)$$

каде што

$F(x_i)$  - оригинална фитнес функција на хромозомот  $i$

$F_s(x_i)$  - скалирана фитнес функција на хромозомот  $i$

$F_{av}$  - средна вредност на фитнес функцијата на тековната популација

$F_{max}$  - максимална вредност на фитнес функцијата на тековната популација

$F_{min}$  - минимална вредност на фитнес функцијата на тековната популација

$a_s$  - параметар за позитивно скалирање проблеми со максимизација, односно за негативно скалирање проблеми со минимизација

$b_s$  - параметар со кој се осигурува дека добиената вредност на фитнес функцијата на хромозомот  $i$  е ненегативна

$sp$  - параметар со кој се регулира притисокот на селекцијата а најчесто  $sp = 2$

Кога се користи линеарно скалирање на фитнес функцијата, очекуваниот број на потомци е приближно пропорционален на перформансите, односно квалитетот на соодветната единка т.е. соодветниот хромозом. Но, сепак и покрај линеарното скалирање, најспособните единки можат да доминираат во популацијата во раните генерации, што доведува до прерана конвергенција и заглавување во локални оптимуми. Со цел подобрување на перформансите на GA, при изборот на фитнес функцијата треба да бидат исполнети следните услови:

- Хромозомите со слични гени треба да имаат слични вредности на фитнес функцијата,
- Фитнес функцијата треба да биде глатка,
- Фитнес функцијата не би требало да има премногу локални минимуми,
- Фитнес функцијата не би требало да има премногу изолирани глобални минимуми итн.

## 6.5 СЕЛЕКЦИЈА

Изборот на единки за репродукција се врши со помош на операторот селекција. Единките се бираат во согласност со вредностите на нивните фитнес функции, на таков начин што оние со поголеми вредности на фитнес функциите имаат поголема веројатност за селекција (преживување) [132, 137]. Спротивно на ова, оние единки со помала вредност на фитнес функцијата имаат помала веројатност за преживување и придонес при создавање на наредната генерација. Процедурата на селекција може исто така да се изврши едноставно со сортирање и селекција на најдобрите единки т.е. хромозоми (оние со најголема вредност на фитнес функцијата). Меѓутоа, ова би довело до прерана конвергенција на GA, односно процесот на оптимизација практично би бил завршен во текот на неколку почетни итерации. Проблемот е во тоа што оваа постапка би довела до загуба на „добриот“ генетски материјал кој може да се содржи во лошите хромозоми (оние со мала вредност на фитнес функцијата), поради што се применуваат други механизми за селекција. Според начинот на кој генетскиот материјал на подобрите хромозоми се копира во наредната генерација, видовите на селекција може да се класифицираат како:

- генерациска селекција (анг. generation selection), при што, директно се одбрани подобрите хромозоми чијшто генетски материјал се копира во следната генерација,
- елиминаторна селекција (анг. elimination selection), каде што се одбрани лошите хромозоми за елиминација, додека подобрите го преживуваат процесот на селекција.

Во зависност од тоа колку добри хромозоми се одбрани во тековната генерација во процесот на селекција или пак, колку лоши хромозоми се одбрани за елиминација во процесот на селекција, типовите на селекција се класифицираат како:

- пропорционална селекција (анг. proportional selection),
  - Simple selection (roulette-wheel selection)
- Stochastic universal sampling
- селекција со рангирање (анг. ranking selection)
  - Sorting selection
  - Linear ranking selection
  - Elitist selection
- Tournament selection
  - k-tournament selection
  - Simple tournament selection

Важно е да се напомене дека поголемата веројатност за преживување на подобрите хромозоми во споредба со кој било друг полош хромозом, претставува заедничка особина на сите типови селекција. Со пропорционалната селекција хромозомите се избираат со веројатност којашто е пропорционална на вредноста на нивната фитнес функција, односно веројатноста за селекција од односот помеѓу вредноста на фитнес функцијата на хромозомот и средната вредност на фитнес функцијата на тековната популација. Селекцијата со рангирање ги избира хромозомите со веројатност во зависност од положбата на хромозомот во низата на хромозоми, коишто се сортирани, односно рангирани според вредноста на нивната фитнес функција. Селекцијата со рангирање може да биде селекција со сортирање (анг. sorting selection) или селекција со турнир (анг. tournament selection).

Бидејќи во предложениот модел на GA на оваа докторска дисертација се применети селекции коишто се од типот на селекција со рангирање, пропорционалната селекција нема да биде предмет на разгледување.

### 6.5.1 Linear ranking selection

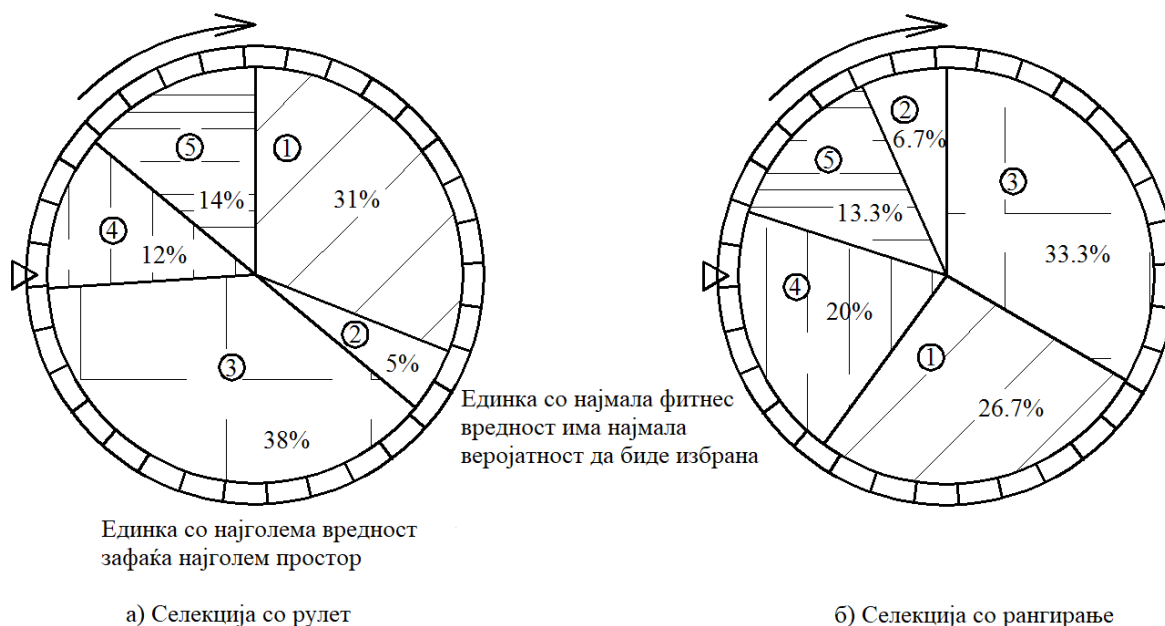
Доколку еден или повеќе хромозоми во популацијата се доминантни во однос на останатите, што е чест случај кај GA, тогаш останатите хромозоми имаат значително мали шанси да бидат селектирани за понатамошно вкрстување. Ова има за последица значително намалување на диверзитетот на популацијата на GA, а следствено и негова прерана конвергенција или заглавување во локален оптимум. Со примена на linear ranking selection се решава претходно наведениот проблем, кој се јавува кај roulette-wheel selection [132, 133].

Кај linear ranking selection, веројатноста за селекција на хромозомот е пропорционална со неговиот ранг во популацијата на хромозоми, коишто се сортирани т.е. рангирани според вредностите на нивните фитнес функции. Веројатноста за селекција на хромозомот  $x_i$  во случај на linear ranking selection, се пресметува според следниот израз:

$$p_{sel}(i) = \frac{i}{\sum_{i=1}^N i} = \frac{2i}{N(N+1)} \quad (6.8)$$

при што на најдобриот хромозом му се доделува ранг  $N$ , а на најлошиот хромозом ранг 1.

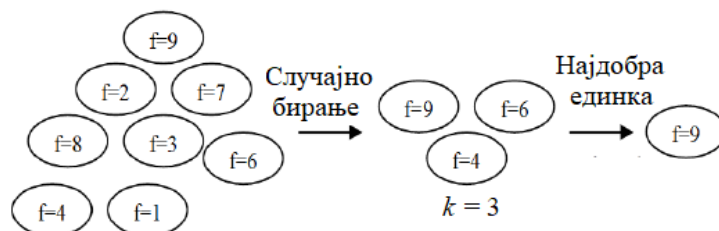
Збирот од веројатностите за селекција на сите хромозоми мора да биде еднаков на 1. Посебност на овој тип на селекција е тоа дека веројатноста да би преживела единката  $i$ , е  $i$  пати поголема од веројатноста за преживување на најлошата единка односно најлошиот хромозом, на кој му е доделен ранг 1. На сликата 6.2 е прикажана споредба помеѓу linear ranking selection и roulette-wheel selection.



Слика 6.2 Споредба помеѓу linear ranking selection и roulette-wheel selection

### 6.5.2 Tournament selection

При tournament selection ( $k = 2, 3, 4, \dots, N$ ) се избираат  $k$  хромозоми со еднаква веројатност, а потоа се избира најдобриот или најлошиот хромозом. Во случај на generation tournament selection,  $k$  хромозоми случајно се избираат  $N$  пати и потоа најдобриот помеѓу нив се селектира за следната генерација. Во случај на elimination tournament selection,  $k$  хромозоми случајно се избираат  $M$  пати, а најлошиот помеѓу нив се елиминира од понатамошната генетска постапка. Параметарот  $k$  се нарекува големина на турнирот. При примена на tournament selection, не се бара рангирање на хромозомите, иако веројатноста за селекција зависи од рангот на хромозомот, бидејќи таа е од типот ranking selection. Во постапката на tournament selection, од значење е само меѓусебниот однос помеѓу  $k$  случајно одбраните хромозоми. Притоа, во секој пар се користат вредностите на фитнес функциите на хромозомите, со цел да се одреди кој е подобар/полош. Нека на најдобриот хромозом му биде доделен ранг 1, а на најлошиот ранг  $N$ . Најдобро рангираниот хромозом не може да биде елиминиран ниту на еден елиминационен турнир, бидејќи преостанатите  $k - 1$  случајно одбрани хромозоми се полошо рангирани од најдобриот [132, 133].



Слика 6.3 Приказ на tournament selection

## 6.6 ВКРСТУВАЊЕ

Вкрстувањето (анг. crossover) кај ГА претставува термин кој означува размена (рекомбинација) на генетските информации во текот на репродукцијата [133, 137]. Операцијата вкрстување е она што го карактеризира т.е. издвојува ГА од другите оптимизациони методи. Вкрстувањето се дефинира и како процес на размена на гени (составен дел на хромозомите) помеѓу два хромозоми, кои во овој случај се нарекуваат родители. Ваквиот процес резултира со создавање еден или два хромозоми, коишто се нарекуваат деца, односно потомци. Во зависност од тоа како се разменуваат гените помеѓу хромозомите родители, но и од типот на ГА, постојат повеќе начини на вкрстување што ќе бидат применети во рамките на оваа докторска дисертација, а може да се класифицираат како:

- Бинарно кодиран ГА
  - Uniform crossover (UX)
  - Two-point crossover (TPX)
- Реално кодиран ГА
  - Simulated Binary crossover (SBX)
  - Heuristic crossover (HX)
  - Laplace crossover (LX)
  - Logistic distribution-based crossover(LogX)

Во овој труд, за операторот вкрстување, е предложен нов пристап кој има за цел одржување на диверзитетот т.е. разноликоста на популацијата, односно спречување алгоритмот да заглави во локален оптимум, или пак да даде недопустливо решение т.е. хромозом со прекршок на ограничувањата. Ваквиот пристап се состои во тоа што на операторот вкрстување му се задава стохастичка природа. Со други зборови, зависно од вредноста на генериран рамномерно распределен случаен број  $r \in [0,1]$ , се избира еден од типовите на вкрстување, односно Laplace Crossover (LX) [26], Arithmetic Crossover (AX) [24, 25] и Simulated Binary Crossover (SBX) [24, 25], на следниот начин:

$$Stochastic\ Crossover = \begin{cases} \text{Laplace Crossover (LX), ако } 0 \leq r < 1/3 \\ \text{Heuristic Crossover (AX), ако } 1/3 \leq r < 2/3 \\ \text{Simulated Binary Crossover (SBX), ако } 2/3 \leq r \leq 1 \end{cases} \quad (6.9)$$



### 6.6.1 Uniform crossover

При Uniform crossover (UX), вкрстувањето се врши во  $b-1$  точки, каде што  $b$  претставува број на битови [132, 134]. Веројатноста дека хромозомот дете ќе наследи ген на еден хромозом родител, изнесува 0,5. Тоа значи дека веројатноста за наследување е идентична за двата родители. Доколку веројатностите за наследување се различни за одредени гени, тогаш ваквото вкрстување се нарекува  $n$ -Uniform crossover. На пример, доколку  $n = 0,3$ , тогаш постои 30% веројатност дека еден ген ќе биде наследен од едниот родител, односно 70% веројатност дека наредниот ген ќе биде наследен од другиот родител. Доколку веројатноста за наследување е различна за одредени гени, тогаш се специфицира маска за вкрстување, како би се дефинирала веројатноста за наследување на секој поединечен ген. UX се врши во согласност со следниот израз:

$$\begin{aligned}
 \text{Родител 1: } & [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0] \\
 \text{Родител 2: } & [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1] \\
 \text{Дете 1: } & [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1] \\
 \text{Дете 2: } & [0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0]
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

### 6.6.2 Two-point crossover

Кај Two-point crossover (TPX), децата хромозоми ги наследуваат гените што се наоѓаат надвор од зоната формирана од двете точки на вкрстување [132, 134]. Гените што се наоѓаат помеѓу двете точки на вкрстување се заменуваат, што е она по што се разликуваат децата хромозоми од нивните родители хромозоми. Операторот TPX е прикажан со следниот израз:

$$\begin{aligned}
 \text{Родител 1: } & [1 \ 1 \ 0 \mid 0 \ 1 \ 0 \mid 1 \ 0] \\
 \text{Родител 2: } & [0 \ 0 \ 1 \mid 0 \ 0 \ 1 \mid 1 \ 1] \\
 \text{Дете 1: } & [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0] \\
 \text{Дете 2: } & [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1]
 \end{aligned} \tag{6.11}$$

### 6.6.3 Simulated Binary Crossover

Примената на Simulated Binary crossover (SBX) се врши во три чекори. Најпрво за параметарот  $u$  се генерира рамномерно распределен случаен број, така што важи  $u \in [0,1)$  [69, 134]. Потоа, во вториот чекор се пресметува параметрот  $\beta_q$  во согласност со изразот:

$$\beta_q = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta_c+1}} & \text{ако } u \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{\frac{1}{\eta_c+1}} & \text{ако } 0.5 < u < 1 \end{cases} \tag{6.12}$$

каде што  $\eta_c$  претставува дистрибутивен индекс на вкрстување, а неговата вредност варира во интервалот  $[1,10]$ .

Конечно, во третиот чекор од двата хромозоми родители  $x^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$  и  $x^{(2)} = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_n^{(2)})$  се врши репродукција на два нови хромозоми деца  $y^{(1)} = (y_1^{(1)}, y_2^{(1)}, \dots, y_n^{(1)})$  и  $y^{(2)} = (y_1^{(2)}, y_2^{(2)}, \dots, y_n^{(2)})$ , коишто се одредуваат во согласност со следниот израз:

$$\begin{aligned} y^{(1)} &= 0.5 \left[ (1 + \beta_q) x^{(1)} + (1 - \beta_q) x^{(2)} \right] \\ y^{(2)} &= 0.5 \left[ (1 - \beta_q) x^{(1)} + (1 + \beta_q) x^{(2)} \right] \end{aligned} \quad (6.13)$$

#### 6.6.4 Heuristic crossover

Карактеристично за Heuristic crossover (HX) е тоа што ако добиениот хромозом дете е надвор од допустливиот простор, се генерира нов рамномерно распределен случаен број  $r \in [0, 1]$  за да се репродуцира нов хромозом дете, со примена на изразот (6.14) [74, 138]. Ако е потребно, процесот се повторува  $n$  пати. Доколку по  $n$  пати, HX не даде допустлив хромозом, тогаш се избира случајна точка во допустливиот простор, наместо добиениот недопустлив хромозом дете. Од друга страна, со HX се добива едно дете од еден пар родители, а за разлика од другите оператори HX ги користи вредностите на fitness функциите при создавањето на детето. Според тоа, како што беше истакнато, од пар родители  $x^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$  и  $x^{(2)} = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_n^{(2)})$ , гените на добиениот хромозом дете  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  се добиваат во согласност со изразот:

$$y_i = r(x_i^{(2)} - x_i^{(1)}) + x_i^{(2)} \quad (6.14)$$

#### 6.6.5 Laplace Crossover

Во оваа докторска дисертација како еден од операторите за вкрстување е предложен Laplace crossover (LX). LX како основна варијатна е првично предложен од страна на Deer и Thakur, а тој во оваа докторска дисертација е за првпат применет на вакот тип оптимизационен проблем. Со примената на LX, двата нови хромозоми деца  $y^{(1)} = (y_1^{(1)}, y_2^{(1)}, \dots, y_n^{(1)})$  и  $y^{(2)} = (y_1^{(2)}, y_2^{(2)}, \dots, y_n^{(2)})$  се репродуцирани т.е. добиени од пар хромозоми родители  $x^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$  и  $x^{(2)} = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_n^{(2)})$  по постапка што ќе биде прикажана во продолжение.

Најпрво, се генерира рамномерно распределен случаен број  $u_i \in [0, 1]$ . Потоа, се генерира случаен број  $\beta_i$ , кој се базира на Лапласовата распределба (анг. Laplace distribution), а е добиен преку инверзија на функцијата на Лапласовата распределба, односно:

$$F(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \exp\left(\frac{|x-a|}{b}\right), & x \leq a, \\ 1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{|x-a|}{b}\right), & x > a \end{cases} \quad (6.15)$$

$$\beta_i = \begin{cases} a - b \log_e(u_i), & u_i \leq 0.5 \\ a + b \log_e(u_i), & u_i > 0.5 \end{cases} \quad (6.16)$$

Потоа, во вториот чекор новите два хромозоми деца се добиваат во согласност со изразот:

$$\begin{aligned} y_i^{(1)} &= x_i^{(1)} + \beta_i |x_i^{(1)} - x_i^{(2)}| \\ y_i^{(2)} &= x_i^{(2)} + \beta_i |x_i^{(1)} - x_i^{(2)}| \end{aligned} \quad (6.17)$$

Од претходните два изрази може да се констатира дека:

- Двете деца се поставени симетрично во однос на нивните родители.
- За помали вредности на параметрот  $b$ , генетскиот код на децата би бил сличен со генетскиот код на родителите, а за големи вредности на  $b$ , децата би биле репродуцирани далеку од своите родители т.е. нивниот генетски код значително би се разликувал од генетскиот код на нивните родители.
- За фиксна вредност на  $a$  и  $b$ , LX генерира деца коишто се пропорционални на своите родители т.е. доколку родителите се близу еден од друг, тогаш и нивните деца би биле близу еден од друг, односно ако родителите се далеку еден од друг, тогаш и нивните деца би биле далеку еден од друг.

Со ваквиот начин на работа, може да се констатира дека LX поседува прилагодливо т.е. адаптивно (анг. self-adaptive) однесување при репродукцијата на нови хромозоми. Токму поради ваквиот факт операторот LX ќе биде применет во рамките на оваа докторска дисертација, а параметрите  $a$  и  $b$  ќе подлежат на автоматско подесување во зависност од нарушените ограничувања. Со други зборови, ако родителите се хромозоми коишто имаат нарушени ограничувања, тогаш  $b$  би имал голема вредност со цел репродукција на хромозоми далеку од своите родители. Во спротивен случај, доколку хромозомите родители имаат добар генетски код т.е. не се со нарушени ограничувања, тогаш параметрите  $a$  и  $b$  ќе имаат фиксна вредност со цел репродукција на деца коишто исто така би биле речиси без нарушени ограничувања.

### 6.6.6 Logistic distribution-based crossover

Во докторската дисертација е предложен и уште еден современ оператор за вкрстување, односно Logistic distribution-based crossover (LogX), кој исто така за првпат ќе биде применет на проблем за оптимизација на погонот на ЕЕС. Операторот LogX ќе биде применет за репродукција на хромозоми од секундарната популација (анг. multi-population), чијашто улога ќе биде прикажана во наредните поглавја. Операторот LogX се базира на Логистичката дистрибуција (анг. Logistic distribution), чијашто функција е прикажана со изразот [71, 139]:

$$f_{\log}(x) = \frac{\exp\left(-\frac{(x-\mu)}{s}\right)}{s \left(1 + \exp\left(-\frac{(x-\mu)}{s}\right)\right)} \quad (6.18)$$

каде што  $\mu, s > 0$  претставуваат параметри на локација и скалирање респективно. Кумулативната функција на логистичката распределба е дадена со:

$$F_{\log}(x) = \frac{1}{\left(1 + \exp^{-\left(\frac{x-\mu}{s}\right)}\right)} \quad (6.19)$$

Со операторот LogX, од пар хромозоми родители  $x^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$  и  $x^{(2)} = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_n^{(2)})$  се врши репродукција, односно добивање два нови хромозоми деца  $y^{(1)} = (y_1^{(1)}, y_2^{(1)}, \dots, y_n^{(1)})$  и  $y^{(2)} = (y_1^{(2)}, y_2^{(2)}, \dots, y_n^{(2)})$ , на следниот начин. Првенствено се врши генерирање на рамномерно распределен случаен број  $u_i \in [0,1]$ . Во вториот чекор се врши пресметка на параметрот  $\beta_i$ . Овој параметар се добива преку инверзија на кумулативната функција на Логистичката распределба, т.е.:

$$F_{\log}(x) = \frac{1}{\left(1 + \exp^{-\left(\frac{x-\mu}{s}\right)}\right)} \quad (6.20)$$

$$u = \frac{1}{\left(1 + \exp^{-\left(\frac{\beta_i-\mu}{s}\right)}\right)} \quad (6.21)$$

$$\frac{1}{u} = 1 + \exp^{-\left(\frac{\beta_i-\mu}{s}\right)} \quad (6.22)$$

$$\frac{1}{u} - 1 = \exp^{-\left(\frac{\beta_i-\mu}{s}\right)} \quad (6.23)$$

$$-\left(\frac{\beta_i - u}{s}\right) = \log\left(\frac{1-u}{u}\right) \quad (6.24)$$

$$-\beta_i + u = s \log\left(\frac{1-u}{u}\right) \quad (6.25)$$

$$\beta_i = \mu - s \log\left(\frac{1-u}{u}\right) \quad (6.26)$$

Конечно, со претходно пресметан параметар  $\beta_i$ , може да се пристапи кон одредување на двата новодобиени хромозоми деца, во согласност со изразите:

$$y_i^{(1)} = 0.5 \left[ (x_i^{(1)} + x_i^{(2)}) + \beta_i \left( |x_i^{(1)} - x_i^{(2)}| \right) \right] \quad (6.27)$$

$$y_i^{(2)} = 0.5 \left[ (x_i^{(1)} + x_i^{(2)}) - \beta_i \left( |x_i^{(1)} - x_i^{(2)}| \right) \right] \quad (6.28)$$

Карактеристично за LogX, а врз основа на изразите (6.26) и (6.27), е тоа што ако параметрот  $\mu$  има фиксна вредност, тогаш при мали вредности на параметрот  $s$  репродуцираните хромозоми деца по својот генетски код се блиску до своите родители.

Во спротивен случај, при големи вредности на параметрот  $s$ , децата значително се разликуваат од своите родители по својот генетски код. Од друга страна, треба да се напомене дека  $\text{LogX}$  врши репродукција на хромозоми што се меѓусебно симетрични.

## 6.7 МУТАЦИЈА

Мутација кај бинарно кодираниот GA се однесува на случајна промена на еден или повеќе гени (од 1 во 0 и од 0 во 1), што се јавува во секоја генерација со одредена однапред дефинирана веројатност [132, 133, 137]. Влијанието што мутацијата го има врз квалитетот на хромозомите т.е. решенијата е најголемо во последните генерации, кога најголем број од хромозомите се со сличен квалитет. Мутацијата е унарен оператор поради фактот што таа се врши над еден хромозом. Таа претставува механизам за избегнување на локалните оптимуми. На пример, ако вредноста на фитнес функцијата на сите хромозоми во популацијата тежнее кон локалниот оптимум, тогаш само произволно пребарување на просторот може да пружи подобро решение. Доволно е еден мутиран хромозом (генериран со мутација) да биде подобар од останатите и сите преостанати хромозоми да се префрлат во пребарувачкиот простор, а кои би имале подобро решение во текот на наредните неколку генерации. Улогата на мутацијата е и да го обнови изгубениот генетски материјал. На пример, ако сите хромозоми во популацијата имаат ист ген на одредена позиција во низата, би било невозможно негова промена без мутација.

Веројатноста за мутација  $p_m$  е еден од клучните параметри на GA. Ако веројатноста за мутација тежи кон еден, тогаш алгоритмот се претвора во алгоритам за случајно пребарување на пребарувачкиот простор со решенија. Од друга страна, ако веројатноста за мутација тежи кон нула, тогаш оптимизациониот процес најверојатно ќе биде прекинат во локален оптимум. Веројатноста за мутација зависи од големината на популацијата и од начинот на претставување на хромозомите. Во класичниот GA ваквата веројатност најчесто се држи константна во текот на целиот оптимизационен процес, иако во многу случаи ваквиот пристап нема да даде глобално оптимално решение. Од друга страна, веројатноста за мутација може да варира во текот на оптимизациониот процес, а ако варира, најчесто таа се зголемува со текот на генерациите. На пример, веројатноста за мутација може да започне со вредност 0.001 и да заврши со вредност 0.1, или пак со некоја зададена вредност кога би поминале одреден број генерации.

Кај реално кодиран GA, мутацијата може да се постигне со мало поместување на вредноста на гените или пак, со случаен избор на нова вредност во рамките на долната и горната граница на променливите. Треба да се напомене дека кај реално кодиран GA се дефинира веројатност за мутација  $p_m$  на целокупниот поединечен хромозом, наместо веројатност за мутација на еден ген од хромозомот  $p_m$ .

Зависно од начинот на кодирање на хромозомите, постојат неколку оператори за мутација, а на едни од нив ќе се посвети посебно внимание и анализа, бидејќи тие се применети во оваа докторска дисертација, т.е.:

- Бинарно кодиран GA
  - Non-uniform mutation (NUM)
- Реално кодиран GA
  - Polynomial mutation
  - Makinen, Periaux, and Toivanen mutation (MPTM)

### 6.7.1 Non-uniform mutation

Со цел да не се наруши квалитетот на хромозомите на бинарно кодираниот GA, особено ако алгоритмот е веќе во последните генерации, кога треба да конвергира кон глобалниот оптимум, во оваа докторска дисертација ќе биде применета Non-uniform mutation (NUM) [69]. Кај примената на NUM, мутираниот ген  $\hat{y}_n^{(i)}$  зависи од доменот на промена, генерираниот рамномерно распределен случаен број  $rand \in [0,1]$ , бројот на тековната генерација  $gen$ , максималниот број генерации  $mgen$ , како и неговата долна граница  $y_{n,lb}^{(i)}$  односно горна граница  $y_{n,ub}^{(i)}$ , како што е прикажано со следниот израз:

$$\hat{y}_n^{(i)} = \begin{cases} y_n^{(i)} + (y_{n,ub}^{(i)} - y_n^{(i)}) \cdot \left(1 - r \left(1 - \frac{gen}{mgen}\right)^\mu\right), & rand \leq 0.5 \\ y_n^{(i)} - (y_n^{(i)} - y_{n,lb}^{(i)}) \cdot \left(1 - r \left(1 - \frac{gen}{mgen}\right)^\mu\right), & rand > 0.5 \end{cases} \quad (6.29)$$

каде што  $r \in [0,1]$  претставува рамномерно распределен случаен број, а  $\mu$  е коефициент на NUM и најчесто има вредност 2 или 5.

### 6.7.2 Polynomial mutation

Во реално кодираниот GA од предложениот алгоритам за Фаза 2, којшто служи за пресметка на ELD на крајното оптимално решение, ќе биде применета Polynomial Mutation (PLM). Нејзината имплементација се состои во следните чекори [69].

Најпрво се генерира рамномерно распределен случаен број  $r \in [0,1]$ , а параметрот  $\bar{\delta}$  се пресметува во согласност со следниот израз:

$$\bar{\delta} = \begin{cases} (2r)^{\frac{1}{(\eta_m+1)}} - 1 & \text{if } r < 0.5 \\ 1 - [2(1-r)]^{\frac{1}{(\eta_m+1)}} & \text{if } r \geq 0.5 \end{cases} \quad (6.30)$$

каде што  $\eta_m$  претставува дистрибутивен индекс со кој се контролира отстапувањето на новиот мутиран хромозом  $\hat{y}_n^{(i)}$  во однос на хромозомот  $y_n^{(i)}$ . Вредноста на  $\eta_m$  варира во интервалот [10,100].

На крај, новиот мутиран хромозом  $\hat{y}_n^{(i)}$  се пресметува во согласност со следниот израз:

$$\hat{y}_n^{(i)} = y_n^{(i)} + (y_{n,ub}^{(i)} - y_{n,lb}^{(i)}) \bar{\delta} \quad (6.31)$$

### 6.7.3 Makinen, Periaux, and Toivanen mutation

Во реално кодираниот GA за фаза 3, од новопредложениот SAGA, ќе биде применета Makinen, Periaux and Toivanen mutation (MPTM), којашто првично била предложена од Makinen [27], за општ оптимизационен проблем, а таа ќе биде за првпат применета на проблем за оптимизација на погонот на ЕЕС. Имплементацијата на MPTM

во реално кодираниот GA, се состои од следното. Најпрво, се генерира рамномерно распределен случаен број  $r \in [0,1]$ . Потоа, новиот мутиран хромозом  $\hat{y}_n^{(i)}$  се пресметува на следниот начин [71]:

$$p = \frac{y_n^{(i)} - y_{n,lb}^{(i)}}{y_{n,ub}^{(i)} - y_n^{(i)}} \quad (6.32)$$

$$\hat{p} = \begin{cases} p - p \left( \frac{p-r}{p} \right)^b & \text{ако } r < p \\ p & \text{ако } r = p \\ p + (1-p) \left( \frac{r-p}{1-p} \right)^b & \text{ако } r > p \end{cases} \quad (6.33)$$

$$\hat{y}_n^{(i)} = (1 - \hat{p}) y_{n,lb}^{(i)} + \hat{p} y_{n,ub}^{(i)} \quad (6.34)$$

каде што  $y_{n,lb}^{(i)}$  и  $y_{n,ub}^{(i)}$  се матрици-редици со горна и долна граница на гените на хромозомот  $i$  ретроспективно.

## 6.8 ЕЛИТИЗАМ

Во оригиналниот генетски алгоритам оваа операција не се користела. Нејзина цел е да зачува одреден број, однапред дефинирани хромозоми од оштетување што може да биде предивикано од другите оператори на генетскиот алгоритам. Имено, однапред дефиниран број хромозоми со најдобра вредност на фитнес функцијата директно се копираат во новата генерација на почетокот на секоја итерација пред кој било друг оператор од генетскиот алгоритам. Елитизмот значително влијае на брзината на конвергенција на алгоритмот [132, 133].

Во предложениот алгоритам, најдобрите добиени решенија т.е. хромозоми се зачувани за следната генерација, така што тие не се губат во текот на генетската постапка. Со други зборови, предложена е стратегија, така што се формира група составена од хромозоми родители и хромозоми деца. Сите овие хромозоми се рангираат според нивната нормализирана фитнес функција по опаѓачки редослед. Половина од хромозомите со најдобра нормализирана фитнес функција од комбинираната популација, се зачувани за понатамошниот генетски процес, кој ќе се врши во наредните генерации [69, 71].

## 6.9 КОНТРОЛНИ ПАРАМЕТРИ НА GA

Кога станува збор за терминот контролни параметри на GA, тој се однесува на неколку параметри и тоа: големината на популацијата, максималниот број на генерации, веројатноста за вкрстување, како и веројатноста за мутација [132, 137].

GA дава различни резултати за различни вредности на контролните параметри, односно подобро или полошо решение се постигнува побрзо или побавно. Во текот на генетската пресметка овие параметри можат да бидат фиксни или варијабилни. Генерално, пристапот со променливи параметри дефинитивно се покажал како подобар. Константните вредности на параметри можат да ја намалат ефикасноста на GA.

Промената на контролните параметри на GA може да биде моделирана како функција од времето бројот на генерациите (што претставува најчест случај), или пак како функција од опсегот на ширење т.е. диверзификација на решенијата т.е. хромозомите. Ако се врши диверзификација на популацијата, тогаш во тој случај треба да се зголеми веројатноста за вкрстување, а да се намали веројатноста за мутација. Во спротивен случај, во случај на униформни решенија т.е. интензификација на популацијата, веројатноста за мутација треба да биде зголемена, а веројатноста за вкрстување да биде намалена. Со други зборови, треба да се намали вкрстувањето, бидејќи ако два идентични хромозоми бидат селектирани за вкрстување, тогаш нема да биде репродуциран нов различен хромозом.

Веројатностите за вкрстување и мутација главно зависат од големината на популацијата. Во најголем дел од GA, типичната големина на популацијата, веројатноста за вкрстување и веројатноста за мутацијата, респективно се движат во интервалите: [20,200], [0.5,1.0], и [0.001,0.05].

## 6.10 КРИТЕРИУМ ЗА ЗАПИРАЊЕ

За разлика од методите што вршат локално пребарување и запираат кога ја наоѓаат оптималната вредност, генетскиот алгоритам поседува стохастичко пребарување што значи дека може да работи без прекин [132]. Поради ова неопходно е да се воведат некој критериум на запирање. Една од можностите е да се изброи колкупати е пресметана фитнес вредноста или да се користи време на пресметка како ограничувачки фактор. Овие два пристапи во практиката не се покажале како најдобри. Еден од најчесто користените критериуми на запирање е бројот на генерации, кој ако се постави на доволно голема вредност дава добри резултати. Еден од подобрите критериуми за запирање е отстапувањето на фитнес функцијата на поединечните хромозоми од средната фитнес функција на целата популација [95]. Ваков критериум врши запирање на алгоритмот во близина на глобалниот оптимум, но не и во самиот глобален оптимум [83].

## 6.11 СОВРЕМЕНИ ТЕХНИКИ ЗА СПРАВУВАЊЕ СО ОГРАНИЧУВАЊАТА

Имајќи предвид дека GA има стохастичка природа, недопустливите решенија не треба веднаш да се отфрлат од пресметката. Примената на соодветна техника за справување со ограничувањата, во комбинација со компатибилни EA каков што е GA, може да го задвижи процесот на пребарување кон глобалниот оптимум, притоа со користење на информациите т.е. генетскиот код на недопустливите решенија. Помеѓу многуте техники за справување со ограничувањата, најчесто применувана техника е техниката со статички фактор на пенализација (анг. static penalty), каде што тој фактор на пенализација се додава на фитнес функцијата на недопустливите решенија т.е. на решенијата со нарушени ограничувања. И покрај нејзината едноставност и лесна имплементација, перформансите на техниката со статички фактор на пенализација во голема мера зависат од вредноста на факторот на пенализација што треба фино да се подеси по принцип „trial and error“, за кој се потребни значително голем број експериментални обиди. За да се избегне потребата од фино подесување на факторот на пенализација, како и големиот број обиди, во оваа докторска дисертација ќе бидат прикажани, односно предложени неколку техники за справување со ограничувањата, коишто за првпат ќе бидат применети во комбинација со GA, за решавање на истражувачкиот проблем.



Како што беше истакнато во поглавјето 5, оптимизациониот проблем со ограничувања, во кој треба да бидат оптимизирани  $d$  параметри, најчесто се пишува на следниот начин [140]:

$$\min f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (6.35)$$

каде што  $x \in R^n$ , а со  $R^n$  е означен пребарувачкиот простор.

$$\begin{aligned} g_i(x) &\leq 0, \text{ за } i = 1, \dots, p \\ h_j(x) &= 0, \text{ за } j = p + 1, \dots, m \end{aligned} \quad (6.36)$$

каде што  $x \in R^n$ , а со  $R^n$  е означен пребарувачкиот простор,  $f(x)$  е критериумска функција,  $g_i(x)$  е ограничување од тип неравенство (анг. inequality constraint),  $h_j(x)$  ограничување од тип равенство (анг. equality constraint),  $p$  е вкупен број на ограничувања од тип неравенство,  $(m - p)$  е вкупен број на ограничувања од тип равенство. Ограничувањата од тип равенство се трансформираат во ограничувања од тип неравенство, па на тој начин вкупното ограничување по нормализацијата (индексот „*nor*“ означува нормализација) на сите ограничувања се претставува како:

$$G_i(x) = \begin{cases} \max [g_{i,nor}(x), 0], & i = 1, \dots, p \\ \max [|h_{i,nor}(x)| - \delta_{tol}, 0], & i = p + 1, \dots, m \end{cases} \quad (6.37)$$

каде што  $\delta_{tol}$  претставува параметар за толеранција за ограничувањата од типот равенство. Критериумската функција  $f(x)$  треба да се минимизира така што добиеното оптимално решение го задоволува вкупното ограничување од тип неравенство  $G_i(x)$ . Вкупното нарушување на ограничувањата (анг. overall constraint violation) за недопустливо решение, претставува пондерирана средна вредност т.е. тежинска средна вредност (анг. weighted mean) од сите ограничувања, а се дефинира како:

$$ocv(x) = \frac{\sum_{i=1}^m w_i (G_i(x))}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad (6.38)$$

каде што  $w_i (= 1 / H_{i,max})$  е тежински параметар,  $G_{i,max}$  е максимална вредност на  $G_i(x)$ . Во предложениот алгоритам,  $w_i$  е поставен на вредност  $1 / G_{i,max}$ , кој варира со текот на генерациите, како би се балансираше влијанието на секое од ограничувањата во оптимизациониот проблем, без оглед на различните нумерички опсези на сите ограничувања.

### 6.11.1 Superiority of feasible solutions

Кај техниката Superiority of feasible solutions (SF), споредбата се врши помеѓу пар решенија односно пар хромозоми [105]. Решението  $x_i$  се смета за подобро од решението  $x_j$  кога:

- $x_i$  е допустливо, но  $x_j$  е недопустливо.

- $x_i$  и  $x_j$  се допустливи, но  $x_i$  има помала вредност на фитнес функција споредбено со  $x_j$ .
- $x_i$  и  $x_j$  се недопустливи, но  $x_i$  има помала вредност на вкупното нарушување на ограничувањата, т.е.  $ocv(x_i) < ocv(x_j)$ , во согласност со изразот (6.35).

Поради тоа, при примената на оваа техника допустливите решенија секогаш се сметаат за подобри во однос на недопустливите. Две допустливи решенија се споредуваат само врз основа на вредноста на нивната фитнес функција, додека две недопустливи решенија се споредуваат само врз основа на вредноста на нивното вкупно нарушување на ограничувањата. Споредбата на недопустливите решенија врз основа на вкупното нарушување на ограничувањата има за цел „туркање“ на недопустливите решенија кон допустливиот регион. Од друга страна, споредбата на две допустливи решенија врз основа на вредноста на нивната фитнес функција, го олеснува подобрувањето на вкупниот квалитет на решенијата.

### 6.11.2 Stochastic ranking

Во оптимизацијата со ограничувања кај која се применува ЕА како на пример ГА, понекогаш треба да се одржува рамнотежа помеѓу објективната минимизација (под претпоставка дека се работи за проблем со минимизација) и вкупното задоволување на ограничувањата за конвергенција кон глобалното допустливо оптимално решение. Во [109] за општ оптимизационен проблем бил предложен стохастички начин, кој се нарекува стохастичко рангирање (анг. stochastic ranking – SR), како би се постигнала рамнотежа помеѓу објективната оптимизација и вкупното нарушување на ограничувањата. Техниката SR користи фактор на веројатност (анг. probability factor)  $p_f$ , како би се дефинирало дали за рангирањето т.е. споредбата на решенијата ќе се користи вредноста на фитнес функцијата, или пак, вкупното нарушување на ограничувањата. Ваквиот процес може да се резимира со поедноставен псевдо-код прикажан во Алгоритмот 6.

---

#### Алгоритам 6 Поедноставен псевдо-код на SR

---

1. **if** ( $ocv(x) = 0$  или  $rand_{SR} < p_f$ ) **then**
    - a. Рангирање врз основа на вредноста на фитнес функција
  2. **else**
    - a. Рангирање врз основа на вкупното нарушување на ограничувањата
  3. **end**
- 

Според тоа, кај SR, споредбата помеѓу две решенија односно два хромозоми се темели или на нивната фитнес функција или на нивното вкупно нарушување на ограничувањата, а ваквата споредба е стохастички дефинирана, т.е. преку генерирање на рамномерно распределен случаен број  $rand_{SR} \in [0,1]$ . Со ваквата постапка се олеснува опстанокот на недопустливите (лошите) хромозоми со супериорна вредност на фитнес функција во текот на генетскиот процес со цел, пребарувањето да може да продолжи кон допустливите региони, коишто содржат глобални оптимуми. SR техниката за справување со ограничувањата се карактеризира со супериорни перформанси кај оптимизациони проблеми со ограничувања, со неповрзани допустливи региони. Понатаму, утврдено е дека перформансите на SR се подобруваат ако факторот на веројатност  $p_f$  линеарно се намалува од вредност 0.475 на вредност 0.025, во текот на сите генерации, наместо да има константна вредност [109]. На пример, доколку

$p_{f,1} = 0.475$  за првата генерација ( $gen = 1$ ), односно  $p_{f,mgen} = 0.025$  за последната генерација ( $gen = mgen$ ), тогаш факторот на веројатност  $p_f$  за која било друга генерација ( $gen > 1$ ) се пресметува во согласност со следниот израз:

$$p_{f,gen} = p_{f,gen-1} - (p_{f,1} - p_{f,mgen}) / (mgen - 1) \quad (6.39)$$

### 6.11.3 Self-adaptive penalty factor

Во оваа докторска дисертација, фитнес функцијата во главната генетска постапка нема да се пресметува на класичен начин, туку за неа е предложен нов пристап во кој е имплементиран статички адаптивен фактор на пенализација (анг. self-adaptive penalty factor), со фактор на отстапување  $d(x)$  и фактор на пенализација  $p(x)$ . Најпрво, ограничувањата од типот равенство се трансформираат во ограничувања од тип неравенство, како што беше претходно истакнато. Потоа се пресметуваат факторот на отстапување  $d(x)$  и факторот на пенализација  $p(x)$ , а следствено и самата фитнес функција, според следниот начин [70, 71]:

$$f_{rel}(x) = \frac{f(x) - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} \quad (6.40)$$

$$ocv(x) = \frac{\sum_{i=1}^m w_i (G_i(x))}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad (6.41)$$

$$d(x) = \begin{cases} ocv(x), & \text{ако } r_f = 0 \\ \sqrt{[f''(x)]^2 + [ocv(x)]^2}, & \text{во друг случај} \end{cases} \quad (6.42)$$

$$M(x) = \begin{cases} 0, & \text{ако } r_f = 0 \\ ocv(x), & \text{во друг случај} \end{cases} \quad (6.43)$$

$$N(x) = \begin{cases} 0, & \text{ако } x \text{ е допустливо} \\ f''(x), & \text{ако } x \text{ е недопустливо} \end{cases} \quad (6.44)$$

$$p(x) = (1 - r_f)M(x) + r_f N(x) \quad (6.45)$$

а потоа вредноста на fitness функцијата изнесува

$$F(x) = d(x) + p(x) \quad (6.46)$$

каде што  $r_f = (\text{број на допустливи хромозоми}) / (\text{големина на популацијата})$ .

Главната предност на предложениот алгоритам е тоа што ваквиот пенализационен фактор не бара подесување на параметрите по принцип “trial and error”, споредбено со класичниот статички фактор на пенализација. Од друга страна, вредноста на фитнес функцијата директно зависи од вредноста на вкупното нарушување на ограничувањата, бројот на нарушени ограничувања, како и уделот на допустливи хромозоми  $r_f$ .

Ако претходната констатација се елаборира подетално, може да се каже дека на секој недопустлив хромозом му се додаваат два фактори на пенализација, како би се

одредиле најдобрите недопустливи хромозоми во тековната популација. Вредноста на факторите на пенализација се контролира со бројот на допустливи хромозоми, коишто фигурираат во тековната популација. Ако во популацијата има неколку допустливи хромозоми, тогаш се додава поголема вредност на пенализација на недопустливите хромозоми со поголемо вкупно нарушување на ограничувањата. Од друга страна, ако во популацијата има неколку допустливи хромозоми, тогаш на недопустливите хромозоми се големи вредности на фитнес функцијата, ќе им се додели помала вредност на пенализација. Ваквиот пристап со два фактори на пенализација, ќе му овозможи на новопредложениот алгоритам да се префрла помеѓу изнаоѓање допустливи хромозоми и барање глобално оптимално решение во секое време во текот на процесот на пребарување.

#### 6.11.4 Constraint Handling (Repair Mechanism)

Ваквата категорија на техники за справување со ограничувањата кај GA, се заснова на примена на посебен механизам (специјално изработен за конкретен оптимизационен проблем), којшто се нарекува и механизам за корекција (анг. repair mechanism – RM) и служи за модификација на гените на кој било недопустлив хромозом, со цел тој да го врати во допустливиот простор [142].

Со предложениот GA, секогаш се добива решение што ги задоволува потребните системски ограничувања, како и ограничувањата кај хидроелектраните и термоелектраните. Меѓутоа, поради примена на генетските оператори вкрстување и мутација, некои ограничувања може да бидат нарушени. Во предложениот GA, еден тип RM се применува кај бинарно-кодираниот GA, а неколку кај реално-кодираниот GA и тоа непосредно по извршување на операторите вкрстување и мутација. Ваквите RM детално ќе бидат прикажани и моделирани во поглавјето 7, во кое и детално ќе биде прикажана вкупната методологија на новопредложениот GA.

#### 6.11.5 Adaptive crossover strategy

Со цел спречување на прерана конвергенција, во овој труд додатно е имплементирана и адаптивна стратегија за вкрстување (којашто на потполно ист начин се базира и за операторот мутација што ќе биде прикажан во следното потпоглавје), за SHTWS проблемот. Со помош на ваквата стратегија е овозможено различните хромозоми во една генерација да имаат различна (адаптивна) веројатност за вкрстување, во согласност со отстапувањето на нивната fitness функција  $f_c$  од средната, т.е [69]:

$$p_c = \begin{cases} k_1 (F_{\max} - F(x)) / (F_{\max} - F_{av}), & F(x) \geq F_{av} \\ k_2, & F(x) < F_{av} \end{cases} \quad (6.47)$$

каде што  $k_1, k_2 < 1$ . Овие константи многу влијаат на перформансите на NSAGA, па се препорачува  $0,8 \leq k_1 \leq 1$ . Во оваа докторска дисертација експериментално е утврдено дека прилично оптималните вредности се  $k_1 = 1$  и  $k_2 = 0,25$ .

#### 6.11.6 Adaptive mutation strategy

Имплементираната адаптивна стратегија за мутација, е моделирана според следниот израз [69]:

---

$$p_M = \begin{cases} k_3 (F_{\max} - F(x)) / (F_{\max} - F_{av}), & F(x) \geq F_{av} \\ k_4, & F(x) < F_{av} \end{cases} \quad (6.48)$$

каде што  $k_3 = 1$  и  $k_4 = 0,15$ .

# ОПТИМИЗАЦИЈА НА ПОГОНОТ НА ЕЕС СОСТАВЕН ОД КЛАСИЧНИ И ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ СО ПРИМЕНА НА NSAGA

Поглавје

7

## 7 ОПТИМИЗАЦИЈА НА ПОГОНОТ НА ЕЕС СОСТАВЕН ОД КЛАСИЧНИ И ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ СО ПРИМЕНА НА NSAGA

### 7.1 ФАЗА 1: МОДЕЛИРАЊЕ НА СТОХАСТИЧНОСТА НА ВЕТЕРНАТА ЕНЕРГИЈА

#### 7.1.1 Обработка на мерните податоци за брзините на ветер

За потребите на оваа докторска дисертација се користени мерните податоци за брзините на ветер за ПВЕ Богданци (мерно место 1). Брзините на ветер се мерени на интервал од десет минути, со што се добиени 52706 вредности за брзините на ветер, во текот на една година.

Најпрво мерните податоци се преработуваат во програмскиот пакет Microsoft Excel, на тој начин што тие се разделуваат по сезони. Со други зборови, вкупниот број податоци се разделува на четири групи, при што секоја група претставува една сезона, а ги опфаќа мерните податоци од календарскиот ден на започнување на сезоната, до календарскиот ден на нејзиното завршување.

Наведените мерни податоци се преработуваат во програмскиот пакет MATLAB, при што се формира база на податоци т.е. датотека „brzini\_veter\_sezona.mat“, која во себе содржи четири матрици, односно матрици со податоци за брзини на ветер за секоја сезона, кои респективно се нарекуваат „data\_prolet“, „data\_letto“, „data\_esen“ и „data\_zima“. Датотеката „brzini\_veter\_sezona.mat“ претставува влезна датотека т.е. влезен параметар во програмата „metod\_na\_newton\_weibull\_parametar“, за пресметка на параметрот на облик и параметрот на скалирање, на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност, а е прикажана со изразот 7.1.

$$brzini\_veter\_sezona = \begin{pmatrix} [data\_prolet]_{13248 \times 1} & [data\_letto]_{13248 \times 1} \\ [data\_esen]_{13104 \times 1} & [data\_zima]_{13104 \times 1} \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

#### 7.1.2 Алгоритам за пресметка на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност

Пресметката на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност се врши со помош на програмата „metod\_na\_newton\_weibull\_parametar.m“. Влезен параметар во оваа програма претставува датотека „brzini\_veter\_sezona.mat“, која како што беше претходно напоменато, во себе содржи четири подматрици, односно подматрици со податоци за брзини на ветер за секој сезона. Предложениот алгоритам за пресметка на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност е составен од два дела, од кои во првиот дел се врши пресметка на сезонските (средни) вредности на параметрите на Weibull-ова функцијана густина на распределба на веројатност, додека во вториот дел се врши пресметка на средните часовни вредности во рамките на една сезона. Предложениот алгоритам е даден во следните неколку чекори:

**Чекор 1 (прв дел):** Избирање сезона за којашто треба да се изврши пресметка на параметрите на двопараметарската Weibull-ова функција на густина на распределба на веројатност, т.е. факторот на облик  $k$  и факторот на скалирање  $c$ .

**Чекор 2 (прв дел):** Решавање на наведените параметри со помош на поставување на равенката (2.34) којашто се нарекува Maximum likelihood method, а потоа поставената

равенка се доведува во облик  $f(x) = c$  и се решава со методот на Newton, во согласност со изразите наведени во потпоглавјето 4.3.1.

**Чекор 3 (прв дел):** Добивање на сезонските (средни) вредности на факторот на облик  $k_{sez}$  и факторот на скалирање  $c_{sez}$ .

**Чекор 4 (втор дел):** Внесување број на десетминутни измерени средни вредности во текот на еден час односно  $n_{sr} = 6$ , како и број на часови во текот на денот односно  $n_h = 24$ .

**Чекор 5 (втор дел):** Прегрупирање на матрицата „brzini\_veter\_sezona.mat“ со влезните параметри за брзината на ветерот. Со други зборови, формирање нова матрица „casovi\_sezona.mat“ со број на редови еднаков на бројот на мерења за еден ден т.е.  $n_h \cdot n_{sr} = 144$  и број на колони еднаков на бројот на денови (од трите карактеристични месеци) во таа сезона.

**Чекор 6 (втор дел):** Моделирање на нова матрица „C.mat“ врз основа на матрицата „casovi\_sezona.mat“, со една колона, а број на редови еднаков на бројот на часови во еден ден т.е. со димензија  $24 \times 1$ . Во оваа матрица нејзините елементи се всушност нејзини подматрици, кои имаат димензија  $6 \times 92$ , односно број на редови еднаков на бројот на мерења во еден час, а број на колони еднаков на бројот на денови во соодветната сезона. Ваквите подматрици всушност ги содржат сите десетминутни мерења за еден час во рамките на целата сезона т.е. десетминутните мерења од сите денови во сезоната за соодветниот час.

**Чекор 7 (втор дел):** Пресметка на часовните вредности за факторот на облик  $k_h$  и факторот на скалирање  $c_h$ . За секој час последователно, а во согласност со изразот (2.36), најпрво се одредуваат  $(\overline{V^3})$  и  $(\overline{V})^3$ , потоа се одредува параметарот  $E_{pf,h}$  со Energy pattern factor методата, кој е потребен за одредување на почетното решение на факторот на облик  $k_h$ .

**Чекор 8 (втор дел):** Пресметка на почетното решение за факторот на облик  $k_{h,poc}$  со помош на изразот (2.37).

**Чекор 9 (втор дел):** Пресметка на часовните вредности за факторот на облик  $k_h$ , преку решавање на изразот (2.34) со методот на Newton и почетно решение  $k_{h,poc}$ .

**Чекор 10 (втор дел):** Добивање на часовните вредности за факторот на облик  $k_h$  и пресметка на факторот на скалирање  $c_h$  за секој час, во согласност со изразот (2.35).

**Чекор 11 (втор дел):** Генерирање датотека „rezultati\_prolet.mat“, „rezultati\_letto.mat“, „rezultati\_esen.mat“, или „rezultati\_zima.mat“ зависно од одбраната сезона, којашто во себе ги содржи сите неопходни влезни параметри за потребите на алгоритмот за Монте Карло симулацијата, којашто претставува следен чекор во Фаза 1.

### 7.1.3 Симулација Монте Карло

Во предложениот алгоритам, симулацијата Монте Карло се врши со помош на програмата „Monte\_Karlo\_simulacija.m“. Влезен параметар во оваа програма претставува една од датотеките „rezultati\_prolet.mat“, „rezultati\_letto.mat“, „rezultati\_esen.mat“ или „rezultati\_zima.mat“, кои се претходно добиени од алгоритмот прикажан во потпоглавјето 7.1.2. Предложениот алгоритам за симулацијата Монте Карло, се состои од следните чекори:



**Чекор 1:** Избор на сезона за којашто треба да се изврши симулацијата Монте Карло.

**Чекор 2:** Вчитување на претходно добиените матрици за факторот на облик и скалирање, односно  $k_h$  и  $c_h$ , а следствено и нивно транспонирање со што се добиваат матриците  $k_j$  и  $c_j$ .

**Чекор 3:** Внесување на посакуваниот број на сценарија  $n_{scen}$ , што треба да се симулираат со Монте Карло методата.

**Чекор 4:** Креирање for циклус со помош на кој за секој час во денот најпрво се генерира матрица  $d_j$  со рамномерно распределени случајни броеви  $d_{j_i} \in [0,1]$ , со димензија  $n_{scen} \times 1$ , чиишто елементи се случајни генерирани веројатности за брзината на ветер.

**Чекор 5:** Генерирање матрица со случајни брзини на ветер, со димензија  $n_{scen} \times 1$ , преку примена на инверзната функција на кумулативна распределба на веројатност на Weibull-овата функција, во согласност со изразот (2.29) и претходно добиените матрици  $k_j$  и  $c_j$ .

**Чекор 6:** Затворање на for циклусот и добивање матрица  $v_{scen}$  со број на редници  $n_{scen} \times n_h$ , којашто во себе ги содржи вредностите на случајно генерираните брзини на ветер за сите часови во текот денот, на кои им соодветствуваат  $n_{scen}$  сценарија со случајни брзини на ветер.

**Чекор 7:** Креирање for циклус за пресметка на излезната активна и реактивна моќност на ветерната електрана за секое сценарио, со примена на програмата „slucajna\_moknost\_vec.m“.

**Чекор 8:** Повикување на програмата „slucajna\_moknost\_vec.m“ чијшто влезен параметар е матрицата со брзини на ветер со димензии  $1 \times 24$ , во која се содржат случајните брзини на ветер за сите часови во текот на денот, за сценариото  $n_{scen,j}$ .

**Чекор 8.1:** Вчитување на матрицата со брзини на ветер  $V_{scen}$  со димензии  $1 \times 24$  и избор на бројот на ветерни турбини во ветерната електрана  $n_{wt}$ .

**Чекор 8.2:** Задавање на параметрите на турбината: брзина на вклучување  $V_{on}$ , номинална брзина  $V_n$ , брзина на исклучување  $V_{off}$ , номинална моќност  $PWT_n$ .

**Чекор 8.3:** Задавање на параметрите на асинхрониот генератор на ветроагрегатот: номинална фреквенција  $f_n$ , номинална моќност  $SGW_n$ , номинален напон  $U_n$ , фазен напон  $U_f$ , индуктивитет на статор  $L_1$ , индуктивитет на ротор  $L_2$ , индуктивитет на магнетизирање  $L_m$ .

**Чекор 8.4:** Определување на базна моќност  $S_b$ , базен напон  $U_b$  и базна импеданса  $Z_b$  за понатамошно претворање од единечни р.и. во апсолутни вредности.

**Чекор 8.5:** Претворање на  $L_1$ ,  $L_2$ , и  $L_m$  од единечни р.и. во апсолутни вредности и пресметка на реактансата на статорот  $X_1$ , реактансата на роторот  $X_2$  и реактансата на магнетизирање  $X_m$ .

**Чекор 8.6:** Одредување на минималната вредност на кондензаторската батерија  $C_{min}$  со примена на изразот (4.88).

**Чекор 8.7:** Одредување на минималната трифазна реактивна енергија, неопходна за напојување на реактансата на магнетизирање  $Q_c$  со примена на изразот (4.89), како и нејзино сведување на напонското ниво на мрежата со примена на изразот (4.90).

**Чекор 8.8:** Пресметка на реактансата на магнетизирање  $X_c$  со примена на изразот (4.91).

**Чекор 8.9:** Креирање for циклус за пресметка на матриците со излезните активни и реактивни моќности на ветерната електрана за секој час  $P_{GW}$  и  $Q_{GW}$ , за тековното сценарио.

**Чекор 8.10:** Пресметка на матрицата  $P_{GW_{scen}}$  (активната моќност на еден ветроагрегат се множи со бројот на идентични турбини  $n_{wt}$ ) во согласност со следниот израз:

$$P_{GW_{w,scen,j}} = \begin{cases} 0, & V_{scen,j} < V_{T,min} \\ \left( \frac{V_{scen,j} - V_{T,min}}{V_{T,n} - V_{T,min}} \right) \cdot P_{WTn}, & V_{T,min} < V_{scen,j} < V_{T,n} \\ P_{WTn}, & V_{T,n} < V_{scen,j} < V_{T,max} \\ 0, & V_{scen,j} > V_{T,max} \end{cases} \quad (7.2)$$

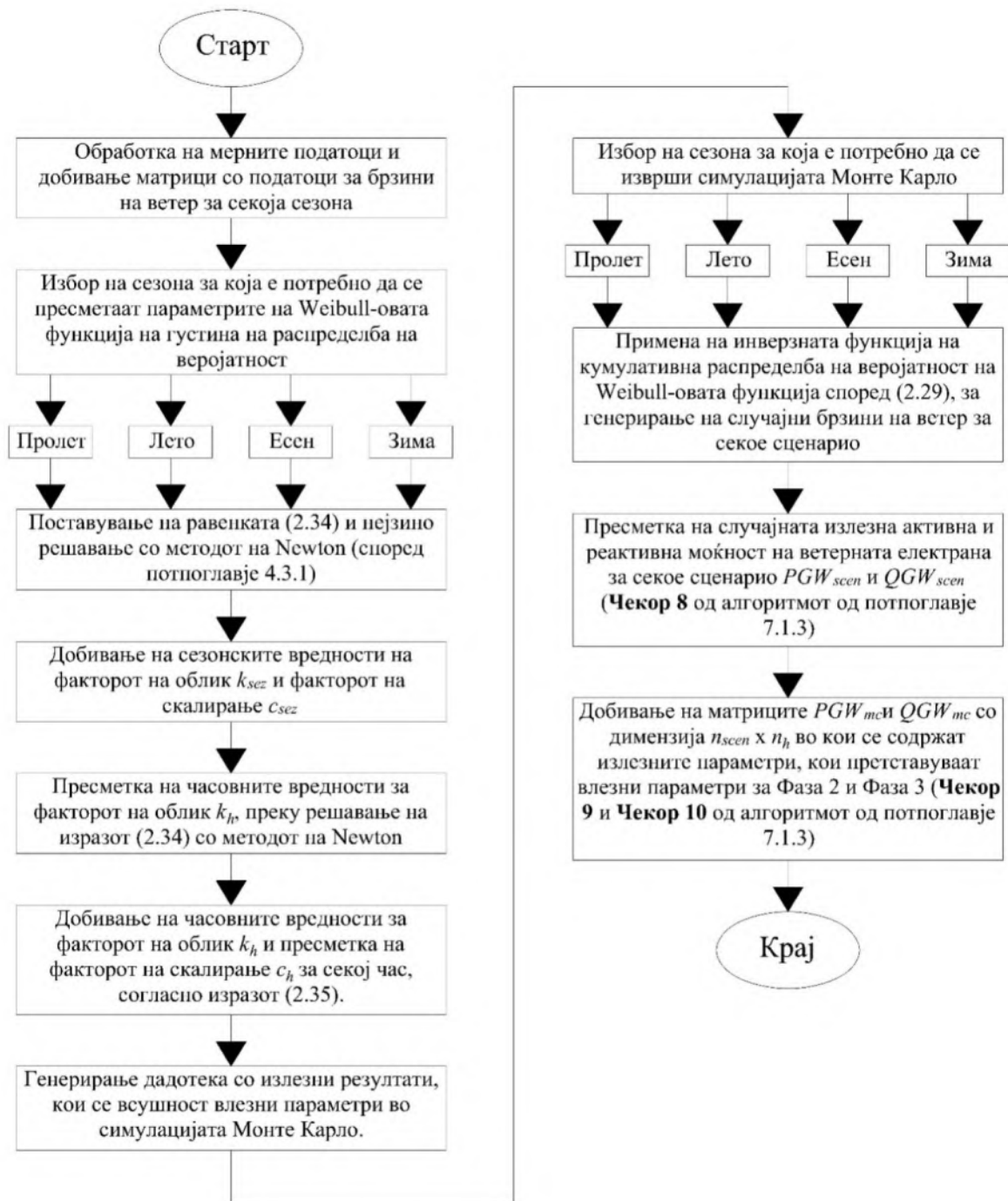
**Чекор 8.11:** Пресметка на матрицата  $Q_{GW_{w,scen}}$  (реактивната моќност на еден ветроагрегат се множи со бројот на идентични турбини  $n_{wt}$ ) со примена на изразот (4.92).

**Чекор 8.12:** Затворање на for циклусот од Чекор 8.9 и добивање на излезните параметри  $P_{GW_{w,scen}}$  и  $Q_{GW_{w,scen}}$ , за сценариото  $n_{scen,j}$ , коишто повторно се предаваат на програмата „Monte\_Karlo\_simulacija.m“.

**Чекор 9:** Затворање на for циклусот за пресметка на излезната активна и реактивна моќност на ветерната електрана за секое сценарио од Чекор 7 и добивање на матриците  $P_{GW_{mc}}$  и  $Q_{GW_{mc}}$  со димензија  $n_{scen} \times n_h$ .

**Чекор 10:** Зачувување на излезните параметри  $P_{GW_{mc}}$  и  $Q_{GW_{mc}}$  за потребите на новопредложениот бинарен NSAGA и реален NSAGA, односно предложените GA за Фаза 2 и Фаза 3.

На слика 7.1 е прикажан дијаграмот на тек т.е. блок дијаграмот на предложениот алгоритам од фаза 1.



Слика 7.1 Дијаграм на тек на Фаза 1 од предложениот алгоритам за оптимизација на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори

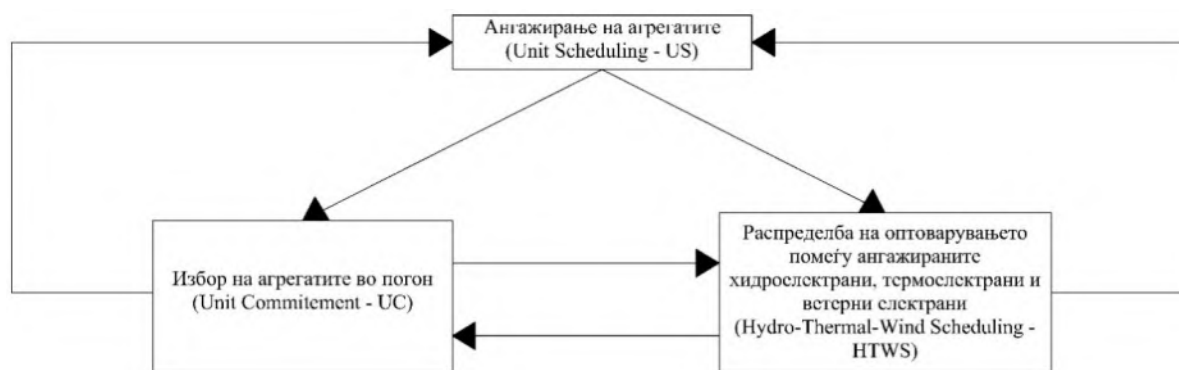
## 7.2 ФАЗА 2: ПОТПРОБЛЕМ UNIT COMMITMENT (UC)

### 7.2.1 Вовед

Оптималното ангажирање на агрегатите подразбира избор на најповолно решение при ангажирање на производните капацитети, како би се задоволеле потребите на конзумот за сигурно и квалитетно снабдување со електрична енергија. Како што беше напомнимато во Поглавје 2, основните видови извори (конвенционални извори) на електрична енергија се хидроелектраните и термоелектраните. Хидроелектраните имале доминантна улога во почетниот стадиум од развојот на електрификацијата во многу земји. Овој извор на енергија обезбедува околу една шестина од светските потреби на електрична енергија (16,4%), а заема удел од над 71% од произведената електрична енергија од обновливи извори. Учеството на термоелектраните (на јаглен) во покривањето на вкупните светски потреби за електрична енергија е околу 40% [143].

Проблемот на оптимално ангажирање на агрегатите (Unit Scheduling - US), т.е. оптимизацијата на погонот на сложен ЕЕС составен од класични и обновливи извори на енергија, може да се подели на следните поврзани потпроблеми:

- потпроблем за избор на агрегатите во погон (Unit Commitment - UC)
- потпроблем за економска распределба на оптоварувањето на агрегатите коишто се во погон – економски диспечинг (Economic Load Dispatch - ELD), при што во оваа докторска дисертација ELD е имплементиран во фазата UC
- потпроблем за распределба на оптоварувањето т.е. координација помеѓу ангажираните хидроелектрани, термоелектрани и ветерни електрани (Hydro-Thermal-Wind Scheduling – HTWS)



Слика 7.2 Декомпозиција на проблемот ангажирање на агрегатите

До решението на глобалниот проблем оптимално ангажирање на агрегатите, може да се дојде и преку одвоено решавање на секој од дефинираните потпроблеми, иако решенијата на потпроблемите се меѓусебно зависни. При решавањето на секој од наведените потпроблеми за оптимално ангажирање на агрегатите, се применува критериум за минимизација на вкупните трошоци за гориво, со уважување на низа погонски и системски ограничувања [81, 84, 97].

Оптималната координација на производните агрегати кои треба да бидат во погон со цел задоволување на потребите на конзумот, е променлива поради временски променливото оптоварување на системот. Пред самата појава на предвиденото оптоварување во системот, на мрежа мора да се синхронизираат производните

капацитети кои би го покриле, со задоволување на неопходната ротирачка резерва како и неопходните сигурносни ограничувања.

Максималното т.е. врвното оптоварување во системот трае најчесто неколку часа на ниво на ден. Доколку на мрежа трајно се синхронизираат сите производни единици за покривање на врвното оптоварување, тие во текот на периодите со вонврвно т.е. базно оптоварување би работеле со мали излезни моќности, кои се блиску на нивните технички минимума. Економичноста на ваквиот погон би била значително помала, бидејќи истиот ќе се карактеризира со високи специфични трошоци за произведена електрична енергија.

Поради тоа, потребно е во периодите на припрема на погонот да се одредат интервалите на ставање и исклучување од погон на производните единици, како би се постигнала максимална економичност на погонот на ЕЕС, со истовремено уважување на сигурносните ограничувања. Ваквиот проблем претставува прв аспект на проблемот оптимизација на погонот на ЕЕС и е познат како проблем за избор на агрегатите во погон (Unit Commitment - UC). Во рамките на оваа докторска дисертација, односно во фаза 2 од предложениот алгоритам, ќе се решава потпроблемот UC во кои имплицитно е имплементиран потпроблемот ELD, кој во предложениот бинарно-кодиран NSAGA ќе биде применет за пресметка на фитнес функцијата т.е. трошоците за гориво на тековната бинарна комбинација на ангажирани производни единици. Следствено на ова, потпроблемот HTWS кој со примена на реално-кодиран NSAGA се решава во фаза 3 од предложениот алгоритам, се базира на добиената оптимална бинарна комбинација т.е. добиеното оптимално решение на потпроблемот UC [81, 84, 97].

## 7.2.2 Математичка формулација на потпроблемот UC

Во оваа докторска дисертација се анализира електроенергетски систем составен од класични и обновливи извори на енергија т.е. од  $NT$  термоелектрани,  $NH$  хидроелектрани и  $NW$  ветерни електрани. Потпроблемот UC се решава со временска резолуција од 1 час, т.е. со 24 временски интервали. Генерално, хидроелектраните работат со што е можно поголема излезна моќност, додека термоелектраните работат со излезна моќност близу ротирачката резерва, или пак се исклучуваат од погон во случај да хидроелектраните можат да го покријат оптоварувањето во системот  $P_P$ , вклучувајќи ги и загубите во преносната мрежа  $P_L$ . Во оваа докторска дисертација, целната т.е. критериумската функција на фазата UC е изразена како минимизација на збирот од вкупните трошоци за гориво  $FT$  и трошоците за ставање во погон  $FS$  на ангажираните термоелектрани.

### 7.2.2.1 Критериумска функција

Трошоците за гориво на термоелектраните најчесто во литературата се претставени со квадратна зависност од излезната моќност на генераторите. Според тоа, критериумската функција на проблемот претставува збир од трошоците за гориво на сите термоелектрани коишто се предмет на оптимизација, т.е. [67, 69, 97, 142, 144]:

$$\min FT = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{NT} F_{t,j} \quad (7.3)$$

$$\forall t \in NT; j \in J$$

каде што  $F_{t,j}$  претставува функција на трошоци за гориво т.е. трошкова карактеристика на термоелектраната  $t$ , а е претставена со квадратната функција:

$$F_{t,j} = a_t + b_t \cdot P_{GT,t,j} + c_t \cdot P_{GT,t,j}^2 \quad (7.4)$$

$$\forall t \in NT; j \in J$$

каде што  $a_t$ ,  $b_t$  и  $c_t$  се константни коефициенти и  $j$  е индекс на интервалот.

Реалната техничко технолошка структура на термоелектраните е таква што турбините се опремени со повеќе регулациони вентили, кои секвенцијално се отвораат при зголемување на излезната моќност на термоелектраната. Ова има за последица дисконтинуитет на влезно-излезната карактеристика на термоелектраната, којашто е последица на наглото зголемување на загубите во млазниците на парната турбина, при секвенцијално инјектирање на пареа во турбината. Експерименталното одредување на точниот облик на влезно-излезната карактеристика на термоелектраната, од еден до друг регулационен вентил, е доста тешко. Поради тоа, во литературата за влезно-излезната карактеристика на термоелектраната, често се применува модел кој содржи висок степен на нелинеарност. Со други зборови, на функцијата трошоци за гориво се додава член со синусна функција (кој во литературата е познат како valve point effect), па точниот модел на функцијата на трошоци за гориво добива неконвексна форма, т.е.:

$$F_{t,j} = a_t + b_t \cdot P_{GT,t,j} + c_t \cdot P_{GT,t,j}^2 + \left| d_t \sin \left( e_t \left( P_{GT,t}^{\min} - P_{GT,t,j} \right) \right) \right| \quad (7.5)$$

$$\forall t \in NT; j \in J$$

каде што  $d_t$  и  $e_t$  се константни коефициенти, а  $P_{GT,t}^{\min}$  е техничкиот минимум на термоелектраната  $t$ .

Трошоците за старт претставуваат трошоци за ангажирање на исклучените термоелектрани, а зависат од времетраењето во кое тие биле надвор од погон, во согласност со следниот израз [69, 97, 142, 144]:

$$FS_{t,j} = \begin{cases} HSC_t & \text{ако } MDT_t \leq T_{t,off}^j \leq (MDT_t + CSH_t) \\ CSC_t & \text{ако } T_{t,off}^j > (MDT_t + CSH_t) \end{cases} \quad (7.6)$$

$$\forall t \in NT; j \in J$$

каде што  $HSC_t$  се трошоци за старт од топла состојба (анг. hotstart cost - HSC) на термоелектраната  $t$ ,  $CSC_t$  се трошоци за старт од ладна состојба (анг. cold start cost - CSC) на термоелектраната  $t$ ,  $MDT_t$  е минимално време на исклучување (анг. minimum downtime - MDT) на термоелектраната  $t$ , а  $T_{t,off}^j$  е број на часови во кои термоелектраната  $t$  била надвор од погон сè до интервалот  $j$ .

Според досега кажаното, вкупната критериумска функција се претставува со изразот:

$$\min F = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{NT} \left[ F_{t,j} \cdot j + FS_{t,j} (1 - u_{t,j-1}) \right] \cdot u_{t,j} \quad (7.7)$$

$$\forall t \in NT; j \in J; u \in \{0,1\}$$

каде  $u$  претставува состојба на ангажираната термоелектрана (0 за исклучена термоелектрана или 1 за вклучена термоелектрана).

## 7.2.2.2 Ограничувања

### 7.2.2.2.1 Генераторско ограничување

Излезната активна моќност на ангажираните термоелектрани и хидроелектрани, е ограничена со нејзиниот технички минимум и технички максимум, т.е. [67, 69, 97, 142, 144]:

$$\begin{aligned} u_{t,j} P_{GT,t}^{\min} &\leq P_{GT,t,j} \leq u_{t,j} P_{GT,t}^{\max} \\ u_{h,j} P_{GH,h}^{\min} &\leq P_{GH,h,j} \leq u_{h,j} P_{GH,h}^{\max} \end{aligned} \quad (7.8)$$

Што се однесува до излезната активна моќност на ангажираните ветерни електрани, имплицитно се уважува преку примена на изразот (7.2).

### 7.2.2.2.2 Ограничување за биланс на моќности

Вкупната излезна моќност на сите термоелектрани, хидроелектрани и ветерни електрани, мора да биде еднаква на вкупното оптоварување и загуби во системот, односно [67, 69, 97, 142, 144]:

$$\sum_{t=1}^{NT} u_{t,j} P_{GT,t,j} + \sum_{h=1}^{NH} u_{h,j} P_{GH,h,j} + \sum_{w=1}^{NW} u_{w,j} P_{GW,w,j} = P_{P,j} + P_{L,j} \quad (7.9)$$

$$P_{L,j} = \sum_{i=1}^{NG} \sum_{j=1}^{NG} P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + \sum_{j=1}^{NG} B_{i0} P_{Gj} + B_{00} \quad (7.10)$$

$$\forall i \in NG; j \in NG; NG = NT + NH$$

### 7.2.2.2.3 Ограничување за ротирачка резерва

Од аспект на зачувување на безбедноста и стабилноста на системот од непредвидени варијации на оптоварувањето, како и од непланирани испади на агрегатите, неопходно е да се обезбеди соодветно ниво на ротирачка резерва (анг. Spinning reserve) во системот. Потребната ротирачка резерва се пресметува според емпириската формула на ENTSO (UCTE), т.е. [67, 69]:

$$R = \sqrt{a_{res} \cdot P_{P,max} + b_{res}^2} - b_{res}; a_{res} = 10 \text{ MW}; b_{res} = 150 \text{ MW} \quad (7.11)$$

каде што  $a_{res}$  и  $b_{res}$  претставуваат емпириски констатни, а  $P_{P,max}$  е врвното оптоварување во системот.

Во оваа докторска дисертација, ваквото сигурно ограничување математички е моделирано на следниот начин:

$$\sum_{i=1}^{NT+NH} u_{i,j} P_{Gi}^{\max} \geq (P_{P,j} + P_{L,j} + R); \forall j \in J; u \in \{0,1\} \quad (7.12)$$

Ако ограничувањето се моделира на тој начин еден дел од вкупната потребна ротирачка резерва да се распредели на термоелектраните, а друг дел на хидроелектраните (со цел спречување на загушување во преносната мрежа), тогаш задоволувањето на ваквото ограничување ќе има за последица нова распределба на моќностите помеѓу термоелектраните и хидроелектраните, а со тоа и нова вредност на трошоците за гориво. Во оваа докторска дисертација, изработениот алгоритам е

моделиран на тој начин така што максимално да се искористи расположливата количина на вода, како за што е можно поголема излезна моќност од хидроелетраните, така и за поголем удел во ротирачката резерва. Сето ова се одразува врз распоредот на ангажирање на термоелектраните, а следствено и врз економичноста на погонот. Според тоа, вака воведениот критериум за алокација на ротирачката резерва, математички е моделиран на следниот начин:

$$\sum_{t=1}^{NT} u_{t,j} P_{GT,t}^{\max} + \sum_{h=1}^{NH} u_{h,j} P_{GH,h}^{\max} \geq P_{P,j} + P_{L,j} + R = P_{P,j} + P_{L,j} + R_T + R_H \quad (7.13)$$

$$\forall j \in J$$

или

$$\sum_{t=1}^{NT} u_{t,j} (P_{GT,t}^{\max} - P_{GT,t,j}) + \sum_{h=1}^{NH} u_{h,j} (P_{GH,h}^{\max} - P_{GH,h,j}) \geq P_{P,j} + P_{L,j} + R_T + R_H \quad (7.14)$$

$$\forall j \in J$$

од каде се добива

$$\sum_{t=1}^{NT} u_{t,j} P_{GT,t}^{SR} \geq R_T \quad (7.15)$$

$$\sum_{h=1}^{NH} u_{h,j} P_{GH,h}^{SR} \geq R_H$$

каде што  $P_{GT,t}^{SR}$  и  $P_{GH,h}^{SR}$  се расположлива ротирачка резерва на термоелектраната  $t$  односно хидроелектраната  $h$ ,  $R_T$  е вкупна потребна ротирачка резерва кај термоелектраните,  $R_H$  е вкупно вкупна потребна ротирачка резерва кај хидроелектраните. Во оваа докторска дисертација по експериментален пат на принцип „trial and error“, е одбрано  $R_T = 0,75R$  и  $R_H = 0,25R$ .

#### 7.2.2.2.4 Ограничување за минималното време на вклучување и исклучување

Минималното време на вклучување на генераторот (анг. minimum uptime – MUT) претставува интервал (во часови), во текот на кој термоелектраната мора непрекинато да биде во погон, по нејзиното вклучување. Аналогно, минималното време на исклучување на генераторот (анг. minimum down-time – MDT) претставува интервал (во часови), во текот на кој термоелектраната мора непрекинато да биде надвор од погон, по нејзиното исклучување [67, 69, 97, 142, 144].

Математичката формулација на наведеното ограничување е претставена со следниот израз:

$$u_{t,j} = \begin{cases} 1, & \text{ако } 1 \leq T_{t,j-1}^{on} \leq MUT_t \\ 0, & \text{ако } 1 \leq T_{t,j-1}^{off} \leq MDT_t \\ 0 \text{ или } 1, & \text{во друг случај} \end{cases} \quad (7.16)$$

каде што  $MUT_t$  е минимално време на вклучување на термоелектраната  $t$ ,  $MDT_t$  е минимално време на исклучување на термоелектраната  $t$ ,  $T_{t,j-1}^{on}$  е број на последователни



часови кога термоелектраната  $t$  е во погон до интервалот  $j$ , а  $T_{t,j-1}^{off}$  е број на последователни часови кога термоелектраната  $t$  е надвор од погон до интервалот  $j$ .

#### 7.2.2.2.5 Ограничување за брзината на промена на моќноста на генераторите (ramp rate)

Промената на излезната моќност кај термоелектраните и хидроелектраните, помеѓу два соседни интервали (кога таа е во погон), е ограничена со помош на изразите [67, 69, 97, 142, 144]:

$$\begin{aligned} P_{GT,t,j} &= \max\left(P_{GT,t}^{\min}, (P_{GT,t,j} - DRT_t)\right) \\ P_{GH,h,j} &= \max\left(P_{GH,h}^{\min}, (P_{GH,h,j} - DRH_h)\right) \\ P_{GT,t,j} &= \min\left(P_{GT,t}^{\max}, (P_{GT,t,j} + URT_t)\right) \\ P_{GH,h,j} &= \min\left(P_{GH,h}^{\max}, (P_{GH,h,j} + URH_h)\right) \end{aligned} \quad (7.17)$$

каде што  $URT_t$ ,  $DRT_t$ ,  $URH_h$ ,  $DRH_h$  претставуваат дозволени нивоа на пораст и намалување на излезната моќност на термоелектраната  $t$ , или хидроелектраната  $h$ .

#### 7.2.2.2.6 Ограничување за преносната моќ на водовите

Активната моќност што протекува низ преносните водови, во текот на целиот оптимизационен период, не смее да биде поголема од максимално дозволената, т.е.:

$$\begin{aligned} |P_{GR,g}| &\leq P_{GR,g}^{\max} \\ \forall g &\in G \end{aligned} \quad (7.18)$$

каде што  $G$  претставува вкупен број преносни водови во системот. Активната моќност на преносниот вод се пресметува врз основа на активната моќност на генераторите, со примена на  $H$  матрицата со димензии  $G \times (NT+NH)$ . Ваквата матрица ја прикажува зависноста на моќноста на водовите од моќноста на генераторите т.е.  $P_{GR} = H \cdot P_G$ , а се добива преку пресметка на тековите на моќност со примена на еднонасочниот DC модел, т.е. DC power flow [67, 69, 97].

#### 7.2.2.2.7 Ограничување за расположлив волумен на вода

Вкупно потрошениот волумен на вода од страна на хидротурбините, во текот на оптимизациониот период, не смее да го надмине расположливиот волумен на вода во акумулациите, т.е.:

$$\sum_{j=1}^J Q_{t,h,j} \cdot T_j \leq V_{h,k} \quad (7.19)$$

каде што  $T_j$  е времетраење на интервалот  $j$ , а со  $Q_{t,h,j}$  е прикажан протокот на вода низ турбината  $h$  во интервалот  $j$ , т.е. влезно-излезната карактеристика на хидроелектраната  $h$ , односно [67, 69]:

$$Q_{t,h}(P_{GH,h}) = \alpha_h + \beta_h \cdot P_{GH,h} + \gamma_h \cdot P_{GH,h}^2 \quad (7.20)$$

каде што  $P_{Ghh}$  е излезна моќност на хидроелектраната  $h$ , а  $\alpha_h$ ,  $\beta_h$  и  $\gamma_h$  се константни коефициенти на влезно-излезната карактеристика, којашто се прикажува со квадратна функција.

#### 7.2.2.2.8 Ограничување за расположливото производство

Ова ограничување што го дефинира максималното можно производство на електрична енергија, во зависност од примарниот ресурс на електраната, е претставено со следниот израз [67, 69]:

$$\sum_{i=1}^{NT+NH} P_{Gi,j} \cdot T_j = W_{\max,i} \quad (7.21)$$

каде што  $W_{\max,i}$  претставува вкупна расположлива енергија на генераторот  $i$  за целиот оптимизационен период.

Треба да се напомене дека максималното можно производство кај хидроелектраната  $h$ , е дефинирано според расположливиот корисен волумен  $V_{hki}$  времето на празнење на акумулацијата  $T_{dis,h}$ , т.е:

$$Q_{\max,h} = Q_{ins,h} = f(\alpha_h, \beta_h, \gamma_h, P_{GH,h}^{\max}) \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (7.22)$$

$$T_{pr,h} = \frac{V_{k,h}}{Q_{\max,h}} \quad [\text{h}] \quad (7.23)$$

$$W_{\max,h} = P_{GH,h}^{\max} \cdot T_{pr,h} \quad [\text{MWh}] \quad (7.24)$$

Што се однесува до ветерните електрани, нивното расположливо производство е од стохастички карактер, односно тоа зависи од веројатноста за појава и брзина на ветерот, онака како што е прикажано во потпоглавјето 2.3.

#### 7.2.2.2.9 Ограничување за биланс на водниот потенцијал

Ваквото сигурно ограничување кај хидроелектраните, може да се прикаже во согласност со следниот израз [67, 69, 97]:

$$V_{h,j} = V_{h,(j-1)} + Q_{d,h,j} - Q_{t,h,j} - Q_{p,h,j} \quad (7.25)$$

каде  $V_{h,j}$  е волумен на акумулацијата  $h$  во интервалот  $j$ ,  $Q_{d,h,j}$  е доток на вода во акумулацијата  $h$  во интервалот  $j$ , а  $Q_{p,h,j}$  е прелив на акумулацијата  $h$  во интервалот  $j$ . Во оптимизацијата  $Q_{p,h,j}$  е занемарен.

### 7.2.3 Примена на бинарно-кодирани NSAGA за решавање на потпроблемот UC

Во предложениот алгоритам, потпроблемот UC се решава со новопредложен бинарно-кодирани NSAGA т.е. со изработена програма којашто се нарекува „uc\_binagen\_ga.m“. Потребните влезни параметри се содржат во соодветна структура со податоци што се нарекува „parametri\_ees\_uc.m“, а таа се вчитува уште во почетната фаза од бинарно-кодираниот NSAGA. Во себе содржи податоци за генераторите во термоелектраните и хидроелектраните (меѓу кои и нивните матрици со коефициентите на загуби), податоци за дневниот дијаграм на оптоварување и дијаграмот на

производство на ветерната електрана, податоци за јазлите и водовите на преносната мрежа, како и податоци со расположливиот волумен на вода кај термоелектраните.

Излезни параметри од програмата се векторот  $PG$  со моќностите на генераторите, бинарната матрица  $A$  со сотојбата на генераторите и вредноста на критериумската функцијата  $F$ , за добиеното оптимално решение, како и преостанатите неопходни излезни параметри кои всушност претставуваат влезни параметри за Фаза 3.

Со цел да се зголеми робусноста на алгоритмот, ELD се решава со квадратна критериумска функција со метод на квадратно програмирање (анг. quadratic programming – QP) и се уважуваат само главните ограничувања (со цел задржување на квалитетот на решенијата), како на пример ограничувањето за биланс на моќности, ограничувањето за брзината на промена на моќноста на генераторите, ограничувањето за расположливото производство, ограничувањето за ротирачка резерва, како и ограничувањето за преносната мрежа. Останатите ограничувања, заедно со неконвексната критериумска функција се уважуваат во крајниот ELD (кој се применува на оптималниот т.е. најдобриот бинарен хромозом), кој се решава со реално-кодиран GA, кој е прикажан во [69]. Почетната популација за крајниот ELD е моделирана врз база на решението добиено со QP. Методологијата за решавање на потпроблемот UC, со помош на новопредложениот бинарно-кодиран NSAGA, се состои од низа чекори, односно:

**Чекор 1:** Вчитување на влезните параметри од датотеката со структура на податоци „parametri\_ees\_uc.m“.

**Чекор 2:** Иницијализација т.е. формирање почетна популација од бинарни хромозоми. Имајќи ја предвид сложеноста на проблемот, т.е. многуте ограничувања кои се во силна меѓусебна корелација со векторот на управувачки променливи, иницијализацијата не се врши по случаен пат т.е. преку стандардна униформна распределба. Во согласност со претходно кажаното, во предложениот алгоритам се генерира популација со големина  $N_{pop}$  од бинарни хромозоми (случајна комбинација од 0 и 1) со должина (број на управувачки променливи)  $(NT + NH) \cdot J$ , кој го задоволуваат стандардниот услов за UC, т.е.

$$\sum_{i=1}^{NT+NH} u_{i,j} \cdot P_{Gi}^{\min} \leq P_{P,j} \leq \sum_{i=1}^{NT+NH} u_{i,j} \cdot P_{Gi}^{\max} \quad (7.26)$$

$$\forall j \in J$$

**Чекор 3:** Пресметка на параметарот Heat Rate –  $HR$  на секоја термоелектрана и формирање на приоритетна листа. Параметрот  $HR$  ја истакнува економичноста на термоелектраната, а се пресметува во согласност со следниот израз:

$$HR_t = \frac{F_t(P_{GT,t}^{\max})}{P_{GT,t}^{\max}} \quad [€/MW] \quad (7.27)$$

Термоелектраната со најмала вредност на параметарот  $HR$  е на врвот од приоритетната листа т.е. најекономична, додека термоелектраната со најголема вредност на параметарот  $HR$  е на дното од приоритетната листа т.е. најскапа.

**Чекор 4:** Креирање while циклус за започнување на главната генетска пресметка, со два паралелни услови за запирање на алгоритмот, т.е. максимален број генерации и

дадена толеранција на отстапување на вредноста на fitness функцијата на хромозомот од средната вредност на fitness функцијата на тековната популација.

**Чекор 5:** Проверка на исполнетоста на условот (7.26) и примена на новопредложен RM за корекција на бинарната матрица на тековниот хромозом. Во предложениот алгоритам пресметката на ELD со QP се врши само на допустливите хромозоми, додека на недопустливите им се доделува голема вредност на критериумската функција и постапката од овој чекор се повторува за следниот хромозом. Со обзир на промената во гените на хромозмот, која може да настане како последица на операторите вкрстување и мутација, може да се случи да многу гени не го исполнуваат условот (7.26). Ваквиот факт може да биде сериозно ограничување за разновидноста на популацијата, бидејќи многу хромозоми би можело да бидат отфрлени, што има за последица прерана конвергенција на алгоритмот, или негово заглавување во локален оптимум. Во оваа докторска дисертација, за потребите на потпроблемот UC е предложен нов RM кој се базира на методот приоритетна листа, а е прикажан во алгоритам 7.

**Алгоритам 7** Псевдо-код на новопредложен RM за потпроблем UC за корекција на бинарните хромозоми според методот приоритетна листа

1. **for**  $j = 1:J$

a. **if**  $\left( \sum_{i=1}^{NT+NH} u_{i,j} \cdot P_{Gi}^{\min} > P_{P,j} \right)$  или  $\left( P_{P,j} > \sum_{i=1}^{NT+NH} u_{i,j} \cdot P_{Gi}^{\max} \right)$  **then**

i. **if**  $\left( \sum_{i=1}^{NT+NH} u_{i,j} \cdot P_{Gi}^{\min} > P_{P,j} \right)$  **then**

1. **while**  $\left( \sum_{i=1}^{NT+NH} u_{i,j} \cdot P_{Gi}^{\min} > P_{P,j} \right)$

a. исклучување на термоелектраните, почнувајќи од онаа со најмал приоритет (најголема вредност на  $HR$ ), а доколку е претходно исклучена, се исклучува наредната сè до исклучување на термоелектраната со најголем приоритет, или додека не се задоволи потребниот услов

2. **end**

ii. **if**  $\left( P_{P,j} > \sum_{i=1}^{NT+NH} u_{i,j} \cdot P_{Gi}^{\max} \right)$  **then**

1. **while**  $\left( P_{P,j} > \sum_{i=1}^{NT+NH} u_{i,j} \cdot P_{Gi}^{\max} \right)$

a. вклучување на термоелектраните, почнувајќи од онаа со најголем приоритет (најмала вредност на  $HR$ ), а доколку е претходно вклучена, се вклучува наредната сè до вклучување на термоелектраната со најмал приоритет, или додека не се задоволи потребниот услов

2. **end**

b. **else**

i. кон **Чекор 6** за пресметка на критериумската функција т.е. ELD на тековниот хромозом

c. **end**

2. **end**

**Чекор 6:** Пресметка на критериумската функција на секој бинарен хромозом, т.е. пресметка на ELD со QR. QR е оптимизационен метод за минимизација на критериумската функција претставена со квадратен полином, а чиишто ограничувања се линеарни [69]. QR го решава оптимизациониот проблем преку одредување на векторот на управувачки променливи, при кој се постигнува минимум на функцијата, односно:

$$\min \left( \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{f}^T \mathbf{x} \right) \quad (7.28)$$

со уважување на ограничувањата од тип на равенство и неравенство, т.е.:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{B}; \mathbf{A}_{eq} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{B}_{eq}; \mathbf{l}_b < \mathbf{x} < \mathbf{u}_b \quad (7.29)$$

каде што  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{A}$ , и  $\mathbf{A}_{eq}$  се квадратни матрици, а  $\mathbf{f}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{B}_{eq}$ ,  $\mathbf{l}_b$ ,  $\mathbf{u}_b$ , их се матрици колони. Проблемот ELD во главната генетска постапка (со уважување на одредени ограничувања кои беа претходно истакнати) може да биде решен со методот QR, но притоа со правилна формулација на проблемот и негово сведување во облик погоден за QR. Со цел поголема робусност на главната генетска постапка, во бинарно-кодираниот NSAGA ќе биде применета функцијата *quadprog*, која е интегрирана во програмскиот пакет MATLAB. Во предложениот алгоритам, а поради големата димензионалност на проблемот, влезните матрици ќе бидат моделирани со метода на ретки матрици (анг. *sparse matrices*), односно со користење на функциите *sparse(i, j, v, m, n, nz)* и *ispeye(n, m)* во MATLAB.

**Чекор 7:** Пресметка на fitness функцијата на хромозмот, врз база на критериумската функција пресметана во **Чекор 6**, т.е.:

$$fitness = \frac{1}{1 + f(x_1, x_2, \dots, x_{(NT+NH)J})} \quad (7.30)$$

**Чекор 8:** Примена на оператор селекција, при што во првите 20 генерации се применува tournament selection, а по 20-тата генерација се применува linear rank selection во согласност со изразот (6.8).

**Чекор 9:** Примена на оператор вкрстување во комбинација со adaptive crossover strategy, при што во првите 20 генерации се применува uniform crossover (UX), а по 20-тата генерација се применува two-point crossover (TPX).

**Чекор 10:** Примена на оператор мутација т.е. non-uniform mutation (NUM) според изразот (6.29), во комбинација со adaptive mutation strategy.

**Чекор 11:** Креирање комбинирана популација од хромозоми родители и хромозоми деца. Пресметка на fitness функцијата во согласност со **Чекор 5**, **Чекор 6** и **Чекор 7**, а следствено и нивно рангирање, како и избор на половина од хромозомите со најдобра релативна fitness функција, за формирање на наредна генерација.

**Чекор 12:** Примена на елитизам, односно реизбор на одреден број елитни единки кои нема да подлежат на вкрстување и мутација.

**Чекор 13:** Проверка на условите за запирање на алгоритмот од **Чекор 4**. Во случај да бидат исполнети, се врши затворање на while циклусот т.е. запирање на алгоритмот и зачувување на добиеното оптимално решение (со првично уважените ограничувања).

**Чекор 14:** Моделирање на почетна популација за одредување на крајното оптимално решение т.е. пресметка на крајниот ELD (со уважување на сите

ограничувања), врз база на претходно добиеното оптимално решение  $P_{G00}$ , во согласност со изразите:

$$\begin{aligned}
 P_{G0,m}^a &= (1-\psi) \cdot P_{G00,m} \\
 P_{G0,m}^b &= (1+\psi) \cdot P_{G00,m} \\
 P_{n,m} &= P_{G0,m}^a + rand \cdot (P_{G0,m}^b - P_{G0,m}^a), \\
 n &= 1, \dots, N_{pop}, \\
 m &= 1, \dots, N_{var} = (NT + NH) \cdot J
 \end{aligned} \tag{7.31}$$

каде што  $\psi$  се нарекува фактор на диверзитет и има вредност 0,04.

**Чекор 15:** Примена на tournament selection.

**Чекор 16:** Примена на simulated binary crossover (SBX), според изразот (6.13).

**Чекор 17:** Примена на polynomial mutation (PM), според изразот (6.31).

**Чекор 18:** Примена на новопредложен RM, кој е прикажан во алгоритам 8.

---

**Алгоритам 8** Псевдо-код на новопредложен RM за потпроблем UC за справување со ограничувањата на реалните хромозоми

---

1.  $WH_{remaining,h} = WH_{max,h} - WH_{vk,h}$ ;
  2.  $WH_{remaining-period,h} = WH_{remaining,h} / 24$ ;
  3. **for**  $i = 1: NH$ 
    - a. **for**  $j = 1: J$ 
      - i. **if**  $P_{GH}(i,j) \neq 0$ 
        1.  $P_{GH}(i,j) = P_{GH}(i,j) + WH_{remaining-period}(i)$ ;
      - ii. **end**
    - b. **end**
  4. **end**
  5. **for**  $i = 1: NH$ 
    - a. **for**  $j = 1: J$ 
      - i. **if**  $P_{GH}(i,j) \neq 0$ 
        1. **if**  $P_{GH}(i,j) \leq \max(P_{GH}^{\min}(i), (P_{GH}(i,j) - DRH(i)))$ 
          - a.  $P_{GH}(i,j) = \max(P_{GH}^{\min}(i), (P_{GH}(i,j) - DRH(i)))$ ;
        2. **elseif**  $P_{GH}(i,j) \geq \min(P_{GH}^{\max}(i), (P_{GH}(i,j) + URH(i)))$ 
          - a.  $P_{GH}(i,j) = \min(P_{GH}^{\max}(i), (P_{GH}(i,j) + URH(i)))$ ;
      3. **end**
      - ii. **end**
    - b. **end**
  6. **end**
  7. **for**  $j = 1: J$ 
    - a.  $WH_{novo}(j) = \sum_{i=1}^{NH} P_{GH}(i,j)$ ;
    - b.  $P_{PT}(j) = P_P(j) + P_L(j) - WH_{novo}(j)$ ;
-

8. **end**

$$9. P_L(j) = \sum_{m=1}^{NT+NH} \sum_{n=1}^{NT+NH} P_{G,m}(j) \cdot B_{mm} \cdot P_{G,n}(j) + \sum_{m=1}^{NT+NH} B_{m0} P_{Gm} + B_{00};$$

10. **for**  $j=1:J$

a.  $\Delta P_{PT}(j) = \sum_{t=1}^{NT} P_{GT}(t,j) - P_{PT}(j) - P_L(j)$

b. **while**  $|\Delta P_{PT}(j)| > 10^{-5}$

i.  $\Delta P_{PT,sr}(j) = \Delta P_{PT}(j) / NT;$

ii. **for**  $t=1:NT$

1. **if**  $P_{GT}(t,j) \neq 0$

a.  $P_{GT}(t,j) = P_{GT}(t,j) - \Delta P_{PT,sr}(j);$

b. **if**  $P_{GT}(t,j) \leq \max(P_{GT}^{\min}(t), (P_{GT}(t,j) - DRT(t)))$

i.  $P_{GT}(t,j) = \max(P_{GT}^{\min}(t), (P_{GT}(t,j) - DRT(t)));$

c. **elseif**  $P_{GT}(t,j) \geq \min(P_{GT}^{\max}(t), (P_{GT}(t,j) + URT(t)))$

i.  $P_{GT}(t,j) = \min(P_{GT}^{\max}(t), (P_{GT}(t,j) + URT(t)));$

d. **end**

2. **end**

3.  $\Delta P_{PT}(j) = \sum_{t=1}^{NT} P_{GT}(t,j) - P_{PT}(j) - P_L(j);$

iii. **end**

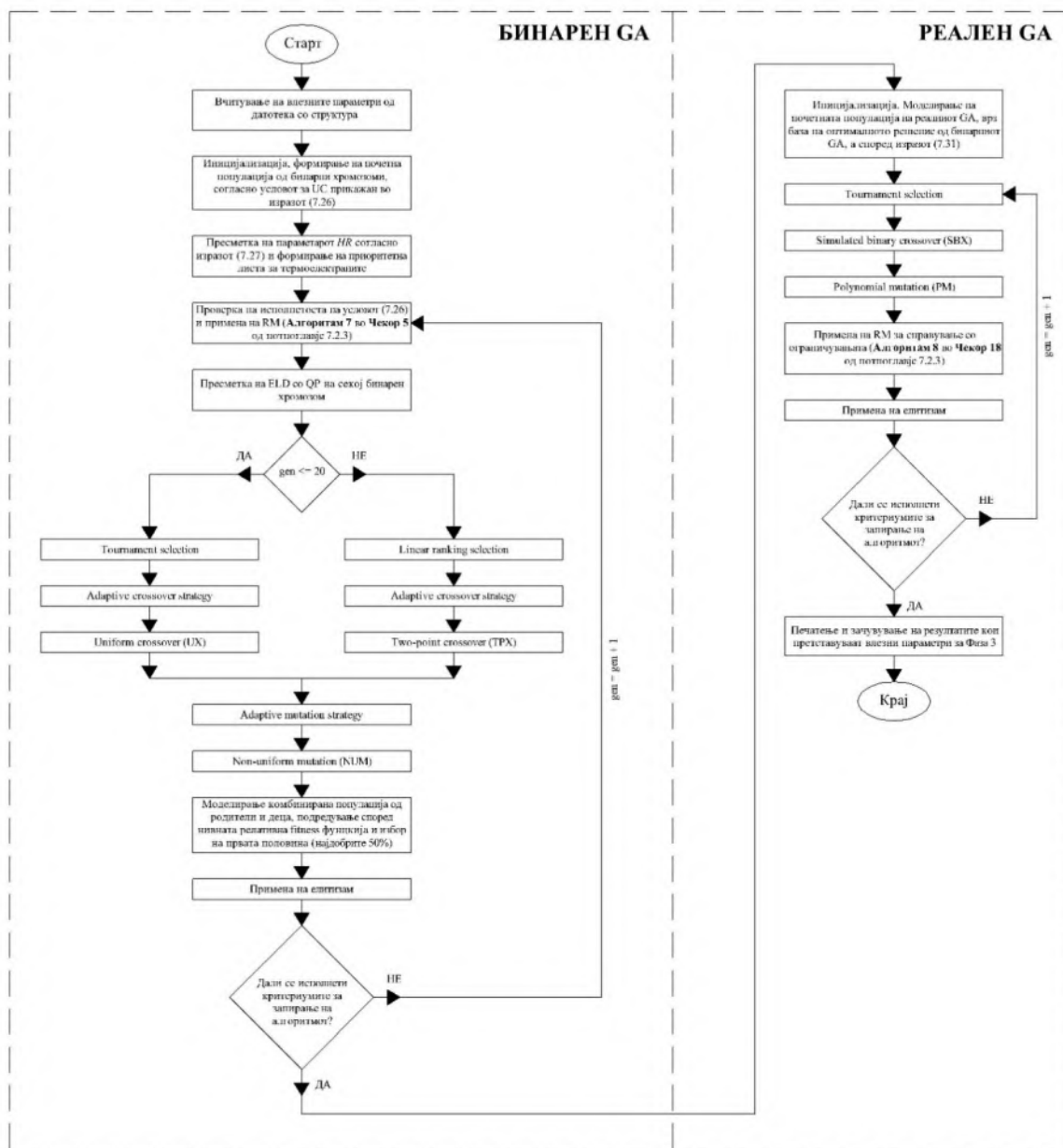
c. **end**

11. **end**

**Чекор 19:** Проверка на исполнетоста на условот за запирање на алгоритмот, односно дали зададената толеранција на отстапување на вредноста на fitness функцијата на хромозомот од средната вредност на fitness функцијата на тековната популација е помала од  $10^{-3}$ .

**Чекор 20:** Доколку е исполнет условот од **Чекор 19**, запирање на алгоритмот и печатење на резултатите.

На слика 7.3 е прикажан дијаграмот на тек т.е. блок дијаграмот на предложениот алгоритам од фаза 2.



Слика 7.3 Дијаграм на тек на фаза 2 од предложениот алгоритам за оптимизација на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори

### 7.3 ФАЗА 3: ПОТПРОБЛЕМ SHORT-TERM HYDRO-THERMAL-WIND SCHEDULING (SHTWS) МОДЕЛИРАН СО DC МОДЕЛ

#### 7.3.1 Вовед

Најголем број од алгоритмите за пресметка на тековите на моќност, а кои се применуваат и при пресметка на оптималните текови на моќности (анг. optimal power flow – OPF), се засноваат на нелинеарни математички модели и итеративни методи, од кои најчесто применуван е Newthom–Raphson-овиот итеративен метод [96, 97]. И покрај високата точност со која се карактеризираат овие методи, во анализите кои се вршат во рамките на планирањето и експлоатацијата на ЕЕС (на пример оптимизација на погонот на погонот на ЕЕС која е предмет на истражување на оваа докторска дисертација)



потребно е да извршат огромен број вакви пресметки, што бара значително време на пресметка и голема компјутерска меморија [81]. Со други зборови, доколку оптимизационите проблеми во планирањето и експлоатацијата на ЕЕС се засноваат на класичен т.е. нелинеарен АС модел за пресметка на тековите на моќност, добиените оптимизациони модели би биле базирани на нелинеарно програмирање. Ова има за последица посложено решавање на проблемот, но од друга страна и добивање физички пореално решение со висока точност, бидејќи се уважуваат поголем број ограничувања, споредбено со решението добиено со DC моделот.

Од претходно наведените причини, во некои анализи во планирањето и експлоатацијата на ЕЕС наместо класичниот АС модел за пресметка на тековите на моќност, се користат неколку приближни најчесто распрегнати модели на тековите на моќност, меѓу кои посебно место зазема линеарниот еднонасочен DC модел.

Една од целите на оваа докторска дисертација е компаративна анализа на АС и DC моделот, како и докажување на оправданоста за примена на АС моделот, иако тој се карактеризира со подолго време на пресметка, имајќи го предвид фактот дека не подлежи на апроксимации, како и можноста за вклучување на поголем број ограничувања, што значително влијае на квалитетот на добиеното решение од оптимизациониот проблем, кој е предмет на истражување на дисертацијата.

### 7.3.2 DC модел за пресметка на тековите на моќност

За изведувањето на DC моделот за пресметка на тековите на моќност [96, 97], се поаѓа од општиот израз за билансот на активните моќности во јазлите на ЕЕС, на АС моделот, односно:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} = G_{ii}U_i^2 + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7.32)$$

каде што со  $G_{ij}$  и  $B_{ij}$  се означени реалните и имагинарните делови на елементите од матрицата на админтанси  $Y = \{Y_{ij}\} = \{G_{ij} + jB_{ij}\}$  на позициите „ $ij$ “, додека  $n$  претставува број на јазли во ЕЕС.

Доколку во изразите за пресметка на матрицата на админтанси се занемарат админтансите  $\bar{Y}_{i0}$  и  $\bar{Y}_{j0}$  и се воведат следните апроксимации:

- $G_{ij} \approx 0$
- $U_i \approx U_j \approx 1.00[\text{p.u.}]$
- $\alpha_{ij} = 1$  (каде што  $\alpha_{ij}$  е однос на трансформација на реалните трансформатори)
- $\cos \theta_{ij} \approx 1; \sin \theta_{ij} \approx \theta_{ij}$

тогаш изразот (7.32) се трансформира во следниот облик:

$$P_i = \sum_{j=1}^n B_{ij} \theta_{ij} = -B_{ii} \theta_{ii} - \sum_{j=1}^n B_{ij} \theta_{ij}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7.33)$$

при што важи

$$B_{ii} = -\sum_{j=1}^n B_{ij} = \sum_{j=1}^n B_{ij}^g; B_{ij}^g = -\frac{1}{X_{ij}^g} \quad (7.34)$$

каде што  $B_{ij}^g$  претставува сускептанса, а  $X_{ij}^g$  реактанса на водот ( $i-j$ ) т.е. водот помеѓу јазлите  $i$  и  $j$ .

Во матрична форма, изразот (7.33) добива облик:

$$P = -B'\Theta \quad (7.35)$$

каде што  $B'$  е матрица на сускептансите на независните јазли на мрежата со димензија ( $n \times n$ ),  $P$  е  $n$ -димензионален вектор на инјектираните активни моќности, а  $\Theta$  е  $n$ -димензионален вектор на фазните агли на напоните на независните јазли.

Матрицата  $B'$  во изразот за инјектирани моќности (7.35) е сингуларна матрица. Меѓутоа, доколку однапред се усвои фазен агол на еден јазол (на пример  $i=1$ ,  $\theta_1=0$  што подразбира балансен јазол), тогаш системот равенки (7.35) се сведува на  $(n-1)$  димензионален систем равенки, т.е.:

$$P_r = -B'_r \Theta_r \quad (7.36)$$

каде што  $B'_r$  е несингуларна, квадратна, редуцирана матрица на сускептансите од ред  $(n-1)$ , добиена со отстранување на редот и колоната од матрицата  $B'$  кои одговараат на балансниот јазол (во овој случај  $i=1$ ), додека  $P_r$  и  $\Theta_r$  респективно претставуваат редуциран вектор на инјектираните активни моќности и редуциран вектор на фазните агли на напоните на независните јазли, со димензија  $(n-1)$ .

Еднонасочниот DC модел го дава изразот за фазните агли на напоните во PQ и PV јазлите, т.е. во сите јазли со исклучок на балансниот јазол ( $i=1$ ), односно:

$$\Theta_r = -[B'_r]^{-1} P_r; \Theta = [0 \quad \Theta_r]^T \quad (7.37)$$

Тековите на моќност по водовите на ЕЕС, а во согласност со DC моделот за пресметка на тековите на моќност, се одредуваат на следниот начин:

$$\begin{aligned} P_{ij} &= b_{ij} (\theta_i - \theta_j) = -b_{ij}^g (\theta_i - \theta_j) = \\ &= \frac{\theta_i - \theta_j}{X_{ij}^g} [\text{p.u.}], \quad i, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (7.38)$$

каде што  $b_{ij}$  е соодветниот елемент на редуцираната матрица на сускептанси  $B'_r$ .

### 7.3.3 Математичка формулација на потпроблемот SHTWS моделиран со DC модел

Главната цел на оптимизациониот потпроблем SHTWS е минимизација на вкупните трошоци за гориво во термоелектраните, преку правилно искористување на обновливите извори на енергија (во оваа докторска дисертација се подразбира на ветерните електрани), со цел задоволување на потребите на конзумот за секој интервал во текот на денот. Она што треба да се напомене е тоа дека најпрвин во согласност со предложениот алгоритам во фаза 2, се врши избор на агрегатите во погон, односно ангажирање на термоелектраните и хидроелектраните, во согласност со дневниот дијаграм на оптоварување, во кој свое учество заема и планираното производство т.е.

излезната моќност од ветерните електрани. Со други зборови, потпроблемот SHTWS се решава врз основа на претходно ангажираните агрегати во фаза 2.

### 7.3.3.1 Критериумска функција

Како што беше истакнато во фаза 2, критериумската функција на проблемот е збир од трошоците за гориво на сите претходно ангажирани термоелектрани, т.е. термоелектраните кои се предмет на оптимизација [71, 84, 97]:

$$\min F = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{NT} [F_{t,j} \cdot j] \cdot u_{t,j} \quad (7.39)$$

$$\forall t \in NT; j \in J; u \in \{0,1\}$$

каде  $u$  претставува состојба на ангажираната термоелектрана (0 за исклучена термоелектрана или 1 за вклучена термоелектрана).

Како што беше истакнато со изразот (7.5), критериумската функција има неконвексна форма, односно:

$$F_{t,j} = a_t + b_t \cdot P_{GT,t,j} + c_t \cdot P_{GT,t,j}^2 + \left| d_t \sin \left( e_t \left( P_{GT,t}^{\min} - P_{GT,t,j} \right) \right) \right| \quad (7.40)$$

$$\forall t \in NT; j \in J$$

### 7.3.3.2 Ограничувања

За добивање физички реално и економски оправдано решение на оптимизациониот проблем SHTWS, треба да се уважат голем број ограничувања, меѓу кои системски и сигурносни, како и ограничувања за термоелектраните и хидроелектраните. Неколку од применетите ограничувања, се претходно моделирани и елаборирани во фаза 2, па за нив овде ќе биде прикажан само соодветниот израз.

#### 7.3.3.2.1 Генераторско ограничување

$$u_{t,j} P_{GT,t}^{\min} \leq P_{GT,t,j} \leq u_{t,j} P_{GT,t}^{\max} \quad (7.41)$$

$$u_{h,j} P_{GH,h}^{\min} \leq P_{GH,h,j} \leq u_{h,j} P_{GH,h}^{\max}$$

#### 7.3.3.2.2 Ограничување за биланс на моќности

$$\sum_{t=1}^{NT} u_{t,j} P_{GT,t,j} + \sum_{h=1}^{NH} u_{h,j} P_{GH,h,j} + \sum_{w=1}^{NW} u_{w,j} P_{GW,w,j} = P_{P,j} + P_{L,j} \quad (7.42)$$

$$P_{L,j} = \sum_{i=1}^{NG} \sum_{j=1}^{NG} P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + \sum_{j=1}^{NG} B_{i0} P_{Gj} + B_{00} \quad (7.43)$$

$$\forall i \in NG; j \in NG; NG = NT + NH$$

#### 7.3.3.2.3 Ограничување за ротирачка резерва

$$R = \sqrt{a_{res} \cdot P_{P,\max} + b_{res}^2} - b_{res}; a_{res} = 10 \text{ MW}; b_{res} = 150 \text{ MW} \quad (7.44)$$

$$\sum_{t=1}^{NT} u_{t,j} (P_{GT,t}^{\max} - P_{GT,t,j}) + \sum_{h=1}^{NH} u_{h,j} (P_{GH,h}^{\max} - P_{GH,h,j}) \geq P_{P,j} + P_{L,j} + R_T + R_H \quad (7.45)$$

$$\forall j \in J$$

$$\sum_{t=1}^{NT} u_{t,j} P_{GT,t}^{SR} \geq R_T \quad (7.46)$$

$$\sum_{h=1}^{NH} u_{h,j} P_{GH,h}^{SR} \geq R_H$$

#### 7.3.3.2.4 Ограничување за брзината на промена на моќноста на генераторите (ramp rate)

$$P_{GT,t,j} = \max \left( P_{GT,t}^{\min}, (P_{GT,t,j} - DRT_t) \right)$$

$$P_{GH,h,j} = \max \left( P_{GH,h}^{\min}, (P_{GH,h,j} - DRH_h) \right) \quad (7.47)$$

$$P_{GT,t,j} = \min \left( P_{GT,t}^{\max}, (P_{GT,t,j} + URT_t) \right)$$

$$P_{GH,h,j} = \min \left( P_{GH,h}^{\max}, (P_{GH,h,j} + URH_h) \right)$$

#### 7.3.3.2.5 Ограничување за преносната моќ на водовите

$$|P_{GR,g}| \leq P_{GR,g}^{\max} \quad (7.48)$$

$$\forall g \in G$$

Како што беше споменато, активната моќност на водот се пресметува според активната моќност на генераторите, со примена на  $H$  матрицата, којашто ја дава зависноста на моќноста на водовите од моќноста на генераторите т.е.  $P_{GR} = H \cdot P_G$ , а се добива преку пресметка на тековите на моќност со еднонасочниот DC модел, кој е прикажан во потпоглавјето 7.3.2.

#### 7.3.3.2.6 Ограничување за расположлив волумен на вода

$$\sum_{j=1}^J Q_{t,h,j} \cdot T_j \leq V_{h,k} \quad (7.49)$$

$$Q_{t,h} (P_{GH,h}) = \alpha_h + \beta_h \cdot P_{GH,h} + \gamma_h \cdot P_{GH,h}^2 \quad (7.50)$$

#### 7.3.3.2.7 Ограничување за расположливото производство

$$\sum_{i=1}^{NT+NH} P_{Gi,j} \cdot T_j = W_{\max,i} \quad (7.51)$$

$$Q_{\max,h} = Q_{ins,h} = f(\alpha_h, \beta_h, \gamma_h, P_{GH,h}^{\max}) \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (7.52)$$

$$T_{pr,h} = \frac{V_{k,h}}{Q_{\max,h}} \quad [\text{h}] \quad (7.53)$$

$$W_{\max,h} = P_{GH,h}^{\max} \cdot T_{pr,h} \quad [\text{MWh}] \quad (7.54)$$

### 7.3.3.2.8 Ограничување за биланс на водниот потенцијал

$$V_{h,j} = V_{h,(j-1)} + Q_{d,h,j} - Q_{t,h,j} - Q_{p,h,j} \quad (7.55)$$

### 7.3.3.2.9 Ограничување за почетен и краен волумен на вода во акумулациите

Ограничувањата за волуменот на вода во акумулациите, на почетокот и на крајот од оптимизациониот период, се прикажуваат во согласност со изразите [71, 84, 97]:

$$\begin{aligned} V_{h,0} &= V_h^{\text{start}} \\ V_{h,24} &= V_h^{\text{end}} \end{aligned} \quad (7.56)$$

### 7.3.3.2.10 Ограничување за проток на вода низ турбината

Протокот на вода низ турбината  $h$ , во секој интервал  $j$ , е ограничен со минималниот и максималниот можен проток на турбината, т.е. [71, 84, 97]:

$$Q_h^{\min} \leq Q_{h,j} \leq Q_h^{\max} \quad (7.57)$$

### 7.3.3.2.11 Ограничување за волуменот на вода во акумулациите

Волуменот на вода во акумулацијата  $h$ , во секој интервал  $j$ , е ограничен со минималниот и максималниот волумен, односно [71, 84, 97]:

$$V_h^{\min} \leq V_{h,j} \leq V_h^{\max} \quad (7.58)$$

## 7.3.4 Примена на реално-кодирани NSAGA за решавање на потпроблемот SHTWS моделиран со DC модел

Во предложениот алгоритам, потпроблемот SHTWS се решава со новопредложен реално-кодирани NSAGA т.е. со изработена програма која се нарекува „realen\_ga\_dc.m“, односно „realen\_ga\_ac.m“ зависно од избраниот модел за пресметка на тековите на моќност. Во ова потпоглавје ќе биде прикажан и елабориран алгоритмот за решавање на потпроблемот SHTWS, кој е моделиран со DC модел.

Потребните влезни параметри се содржат во соодветна структура со податоци, која се нарекува „parametri\_ees\_dc.m“, а се вчитува уште во почетната фаза од алгоритмот. Таа во себе содржи податоци за генераторите во термоелектраните и хидроелектраните (меѓу кои и нивните матрици со коефициентите на загуби), податоци за дневниот дијаграм на оптоварување и дијаграмот на производство на ветерната електрана, податоци за јазлите и водовите на преносната мрежа, како и податоци со расположливиот волумен на вода кај хидроелектраните. Со други зборови, се внесуваат параметри за системот кој треба да се оптимизира, на пример IEEE14, IEEE30 итн.

Излезни параметри од програмата се векторот  $PG$  со моќностите на генераторите, вредноста на критериумската функцијата  $F$  за добиеното оптимално решение, загубите во системот, протокот на вода низ турбините, волуменот на вода во акумулациите за секој интервал, моќноста низ преносните водови, итн.

Со цел „поправка“ на хромозомите т.е. нивно враќање во рамките на допустливиот простор, а со тоа и добивање глобално оптимално решение, за решавање на проблемот SHTWS со DC модел се предложени три нови механизми за справување со

ограничувањата т.е. RM, а се прикажани во алгоритам 9, 10 и 11. Алгоритмот за решавање на потпроблемот SHTWS моделиран со DC модел, со помош на новопредложениот реално-кодирани NSAGA, се состои од неколку чекори, односно:

**Чекор 1:** Вчитување на влезните параметри од датотеката со структура на податоци „parametri\_ees\_dc.m“.

**Чекор 2:** Иницијализација т.е. формирање почетна прелиминарна популација со големина 200 од реално-кодирани хромозоми, врз основа на добиеното оптимално решение од фаза 2, со примена на следниот израз [69]:

$$\begin{aligned} P_{G0,m}^a &= (1-\psi) \cdot P_{GUC,m} \\ P_{G0,m}^b &= (1+\psi) \cdot P_{GUC,m} \\ P_{n,m} &= P_{G0,m}^a + rand \cdot (P_{G0,m}^b - P_{G0,m}^a), \\ n &= 1, \dots, N_{pop}, \\ m &= 1, \dots, N_{var} = (NT + NH) \cdot J \end{aligned} \quad (7.59)$$

каде што  $\psi$  претставува фактор на диверзитет, кој има вредност 0.3.

**Чекор 3:** Пресметка на вредноста на fitness функцијата во согласност со изразот:

$$F(x) = \begin{cases} f(x) & \text{ако } x \text{ е допустливо} \\ f_{\max} + \left[ \sum_{i=1}^I \langle g_i(x) \rangle + \sum_{j=1}^J |h_j(x)| \right] & \text{ако } x \text{ е недопустливо} \end{cases} \quad (7.60)$$

како и пресметка на параметарот  $osv$  со примена на изразите (6.37) и (6.38).

**Чекор 4:** Примена на техниката SF, елаборирана во потпоглавјето 6.11.1. Избор на најдобрите 100 хромозоми од прелиминарната почетна популација и формирање финална почетна популација за потребите на генетската пресметка. Ваквата манипулација е со цел зголемување на робусноста на алгоритмот, но и задржување на квалитетот на почетната популација.

**Чекор 5:** Задавање вредност 1 на бројот на генерација, т.е.  $gen = 1$ . Подесување на вредноста на параметрите за техниката SR, т.е.  $p_{f,1} = 0.475$ , односно  $p_{f,ngen} = 0.025$ .

**Чекор 6:** Креирање while циклус за започнување на главната генетска пресметка, со два паралелни услови за запирање на алгоритмот, т.е. максимален број генерации и дадена толеранција на отстапување на вредноста на fitness функцијата на хромозомот од средната вредност на fitness функцијата на тековната популација.

**Чекор 7:** Промена на вредноста на параметрите за техниката SR, т.е.  $p_{f,gen}$ , зависно од индексот на тековната генерација  $gen$ .

**Чекор 8:** Пресметка на вредноста на fitness функцијата со примена на техниката self-adaptive penalty factor во согласност со изразот (6.46), како и пресметка на параметарот  $osv$  со примена на изразите (6.37) и (6.38).

**Чекор 9:** Примена на linear ranking selection.

**Чекор 10:** Примена на Laplace crossover (LX) според изразот (6.17), во комбинација со adaptive crossover strategy според изразот (6.47), за добивање на хромозомите потомци

во главната популација. Примена на Logistic distribution-based crossover (LogX) за добивање на хромозмите потомци во споредната (trial) популација.

**Чекор 11:** Примена на Makinen, Periaux and Toivanen mutation (MPTM) според изразот (6.34), во комбинација со adaptive crossover strategy според изразот (6.48), за мутација на хромозмите потомци во главната популација. Примена на Polynomial mutation (PM) според изразот (6.31), за мутација на хромозмите потомци во споредната (trial) популација.

**Чекор 12:** Пресметка на вредноста на fitness функцијата на хромозомите од главната популација и trial популацијата, со примена на техниката self-adaptive penalty factor во согласност со изразот (6.46), како и пресметка на параметрот  $ocv$  со примена на изразите (6.37) и (6.38).

**Чекор 13:** Примена на техниката SR, којашто е прикажана во алгоритам 9. Замена на хромозомот  $y_n$  од главната популација, со хромозомот  $y_{trial,n}$  од trial популацијата за следната генерација, ако хромозомот  $y_{trial,n}$  од trial популацијата е подобар од хромозомот  $y_n$  од главната популација, во согласност со условите за техниката SR, прикажана во потпоглавјето 6.11.2.

---

**Алгоритам 9** Псевдо-код на новопредложената техника Stochastic ranking (SR) за справување со ограничувањата

---

1. **for**  $n=1:N$ 
    - a.  $rand_{SR} = rand[0,1]$
    - b. **if**  $(ocv_{trial,n} = 0)$  or  $(rand_{SR} < p_{f,gen})$ 
      - i. **if**  $F_{trial,n} < F_n$ 
        1.  $y_n = y_{trial,n}$
      - ii. **end**
    - c. **elseif**  $rand_{SR} > p_{f,gen}$ 
      - i. **if**  $ocv_{trial,n} < ocv_n$ 
        1.  $y_n = y_{trial,n}$
      - ii. **end**
    - d. **end**
  2. **end**
- 

**Чекор 14:** Креирање комбинирана популација од хромозоми родители и хромозоми деца. Пресметка на fitness функцијата, а следствено и нивно рангирање, како и избор на половина од хромозомите со најдобра релативна fitness функција, за формирање наредна генерација.

**Чекор 15:** Примена на новопредложените RM што се прикажани во алгоритам 10, 11 и 12.

---

**Алгоритам 10** Псевдо-код на новопредложен RM за потпроблем SHTWS моделиран со DC модел за справување со ограничувањето за почетен и краен волумен на вода

---

1.  $V_1^{\text{end}} = v \cdot 10^4$ ;  $V_2^{\text{end}} = v \cdot 10^4$
  2.  $\varepsilon_h = 0.1$ ;  $iter_{\text{max}} = 7$ ;  $j_{\text{min}} = 1$ ;  $j_{\text{max}} = ND$ ;  $iter = 1$
  3. **while**  $h \leq NH$
-

- a.  $\Delta V_h = V_h^{\text{initial}} + \sum_{j=1}^J I_{h,j} - \sum_{j=1}^J Q_{h,j} - V_h^{\text{end}}$
  - b. **if** ( $|\Delta V_h| \leq \varepsilon_h$ ) or ( $iter > iter_{\text{max}}$ )
    - i.  $j_{\text{rand}} = \text{randi}([j_{\text{min}} \ j_{\text{max}}], 1, 1)$
    - ii.  $Q_{h,j_{\text{rand}}} = \max(Q_h^{\text{min}}, (\min(Q_{h,j_{\text{rand}}} + \Delta V_h, Q_h^{\text{max}})))$
  - c. **else**
    - i.  $Q_{h,J} = [Q_{h,1} \ Q_{h,2} \ \dots \ Q_{h,24}]$
    - ii.  $Q_{h,J} = \max(Q_h^{\text{min}}, (\min(Q_{h,J} + \Delta V_h / ND, Q_h^{\text{max}})))$
    - iii.  $iter = iter + 1$
  - d. **end**
4. **end**

**Алгоритам 11** Псевдо-код на новопредложен RM за потпроблем SHTWS моделиран со DC модел за справување со ограничувањето за проток на вода низ турбината

1. **for**  $h = 1: NH$ 
  - a. **for**  $j = 1: ND$ 
    - i. **if**  $Q_{h,j} < Q_h^{\text{min}}$ 
      1.  $Q_{h,j} = Q_h^{\text{min}}$
    - ii. **elseif**  $Q_{h,j} > Q_h^{\text{max}}$ 
      1.  $Q_{h,j} = Q_h^{\text{max}}$
    - iii. **end**
  - b. **end**
2. **end**

**Алгоритам 12** Псевдо-код на новопредложен RM за потпроблем SHTWS моделиран со DC модел за справување со ограничувањето за биланс на моќности и ramp rate

1. **for**  $i = 1: NH$ 
  - a. **for**  $j = 1: J$ 
    - i. **if**  $P_{\text{GH}}(i, j) \neq 0$ 
      1. **if**  $P_{\text{GH}}(i, j) \leq \max(P_{\text{GH}}^{\text{min}}(i), (P_{\text{GH}}(i, j) - DRH(i)))$ 
        - a.  $P_{\text{GH}}(i, j) = \max(P_{\text{GH}}^{\text{min}}(i), (P_{\text{GH}}(i, j) - DRH(i)));$
      2. **elseif**  $P_{\text{GH}}(i, j) \geq \min(P_{\text{GH}}^{\text{max}}(i), (P_{\text{GH}}(i, j) + URH(i)))$ 
        - a.  $P_{\text{GH}}(i, j) = \min(P_{\text{GH}}^{\text{max}}(i), (P_{\text{GH}}(i, j) + URH(i)));$
      3. **end**
    - ii. **end**
  - b. **end**
2. **end**
3. **for**  $j = 1: J$

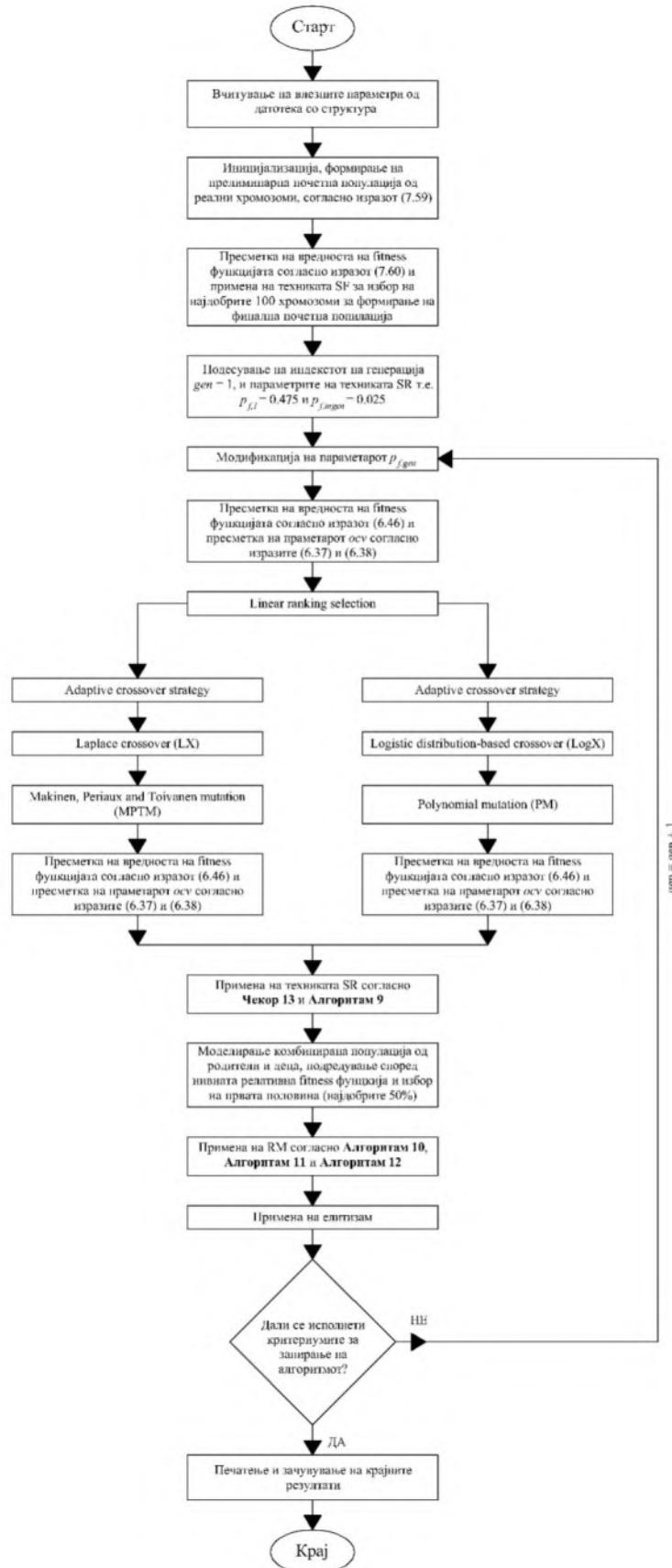


- a.  $WH_{\text{new}}(j) = \sum_{i=1}^{NH} P_{GH}(i, j);$
- b.  $P_{PT}(j) = P_P(j) + P_L(j) - WH_{\text{new}}(j);$
4. **end**
5.  $P_L(j) = \sum_{m=1}^{NT+NH} \sum_{n=1}^{NT+NH} P_{G,m}(j) \cdot B_{mn} \cdot P_{G,n}(j) + \sum_{m=1}^{NT+NH} B_{m0} P_{Gm} + B_{00};$
6. **for**  $j = 1 : J$ 
  - a.  $\Delta P_{PT}(j) = \sum_{t=1}^{NT} P_{GT}(t, j) - P_{PT}(j) - P_L(j)$
  - b. **while**  $|\Delta P_{PT}(j) > 10^{-3}|$ 
    - i.  $\Delta P_{PT, \text{mean}}(j) = \Delta P_{PT}(j) / NT;$
    - ii. **for**  $t = 1 : NT$ 
      1. **if**  $P_{GT}(t, j) \neq 0$ 
        - a.  $P_{GT}(t, j) = P_{GT}(t, j) - \Delta P_{PT, \text{mean}}(j);$
        - b. **if**  $P_{GT}(t, j) \leq \max(P_{GT}^{\min}(t), (P_{GT}(t, j) - DRT(t)))$ 
          - i.  $P_{GT}(t, j) = \max(P_{GT}^{\min}(t), (P_{GT}(t, j) - DRT(t)));$
        - c. **elseif**  $P_{GT}(t, j) \geq \min(P_{GT}^{\max}(t), (P_{GT}(t, j) + URT(t)))$ 
          - i.  $P_{GT}(t, j) = \min(P_{GT}^{\max}(t), (P_{GT}(t, j) + URT(t)));$
        - d. **end**
      2. **end**
      3.  $\Delta P_{PT}(j) = \sum_{t=1}^{NT} P_{GT}(t, j) - P_{PT}(j) - P_L(j);$
    - iii. **end**
    - c. **end**
  7. **end**

**Чекор 16:** Примена на елитизам, односно реизбор на одреден број елитни единки коишто нема да подлежат на вкрстување и мутација.

**Чекор 17:** Проверка на условите за запирање на алгоритмот од **Чекор 6**. Во случај да бидат исполнети, се врши затворање на **while** циклусот т.е. запирање на алгоритмот и зачувување на добиеното оптимално решение (со првично уважените ограничувања). Доколку не се исполнети условите од **Чекор 6**, повторување на **Чекорите 7 - 16**.

На слика 7.4 е прикажан дијаграмот на тек т.е. блок дијаграмот на предложениот алгоритам од фаза 3, со примена на DC модел.



Слика 7.4 Дијаграм на тек на Фаза 3 (DC модел) од предложениот алгоритам за оптимизација на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори

## 7.4 ФАЗА 3: ПОТПРОБЛЕМ SHORT-TERM HYDRO-THERMAL-WIND SCHEDULING (SHTWS) МОДЕЛИРАН СО АС МОДЕЛ

### 7.4.1 Вовед

Одредувањето на оптимални текови на моќност со АС моделот т.е. АС Optimal Power Flow (OPF) е комплексен оптимизационен проблем за оперативно планирање на електроенергетскиот систем (ЕЕС), поради неговата зависност од многуте ограничувања од тип на равенство и неравенство. Под овие ограничувања се подразбираат ограничувањата за: биланс на моќности, променливите кондензаторски батерии т.е. шантови, напоните на јазлите, како и ограничувањето за капацитетот на преносните водови. Целта на оптимизациониот проблем АС OPF е одредување на вредностите на контролните променливи, односно како успешно да се изврши АС OPF како би се добиле сите зависни т.е. состојбени променливи. Решението се констатира дека е оптимално доколку ги дава минималните трошоци за гориво на сите термоелектрани, со истовремено задоволување на сите ограничувања. Нормално, треба да се напомене дека АС OPF се врши само за еден интервал.

Оптимизациониот проблем краткорочна хидро-термо координација т.е. Short-term Hydrothermal Scheduling (SHTS) моделирана со АС модел, е релативно различен од АС OPF, бидејќи во ЕЕС се вклучени и термоелектрани и хидроелектрани. Целта на АС SHTS е да ги минимизира трошоците за гориво на термоелектраните, во повеќе различни интервали (најчесто 24 или 48 со резолуција од 1 час), со истовремено задоволување на сите ограничувања, како што се ограничувањата за: биланс на моќности, техничките граници на генераторите, минимален и максимален проток, биланс на водениот потенцијал итн. Додатно на ова, оптималната работа на ЕЕС составен и хидроелектрани и термоелектрани, е поделена на повеќе подинтервали, што е значително посложено во однос на еден подинтервал кај АС OPF. Очигледно, АС OPF ги уважува сите ограничувања на термоелектраните и преносните водови, но ограничувањата на хидроелектраните се занемарени.

Оптимизацијата на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори на енергија, т.е. оптимизациониот проблем Short-term Hydro-Thermal-Wind Scheduling (SHTWS) моделиран со АС модел, претставува експанзија на SHTS моделиран со АС модел. Ова има за последица значително зголемување на неговата комплексност, имајќи предвид дека во пресметката на тековите на моќност се вклучени генераторски јазли со ветерни електрани, кои подлежат на посебно моделирање.

### 7.4.2 Математичка формулација на потпроблемот SHTWS моделиран со АС модел

Потполно идентично како кај DC моделот, така и кај АС моделот, главната цел е минимизација на вкупните трошоци за гориво во термоелектраните, преку рационално искористување на обновливите извори на енергија, со цел да се задоволат потребите на конзумот за секој оптимизационен интервал. Како што беше напоменато кај DC моделот, најпрво се примена на предложениот алгоритам во фаза 2, се врши избор на агрегатите во погон, односно ангажирање на термоелектраните и хидроелектраните, во согласност со дневниот дијаграм на оптоварување, а потпроблемот SHTWS се решава врз основа на претходно ангажираните агрегати во фаза 2. Но, она што треба да се каже е тоа дека овде кај АС моделот, дополнителните влезни параметри што се потребни за пресметка на тековите на моќност со методот на Newton-Raphson (како на пример реактивната

моќност на генераторите, одредувањето на типовите на јазлите, привидната моќност на водовите, реактивната моќност на компензаторите итн.), дополнително се вчитуваат од друга структура со податоци, којашто е наменета само оптимизација со примена на АС моделот.

#### 7.4.2.1 Критериумска функција

Како кај DC моделот така и овде, критериумската функција на проблемот е збир од трошоците за гориво на сите претходно ангажирани термоелектрани од фаза 2, т.е. термоелектраните коишто се предмет на оптимизација [71, 84, 97]:

$$\min F = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{NT} [F_{t,j} \cdot j] \cdot u_{t,j} \quad (7.61)$$

$$\forall t \in NT; j \in J; u \in \{0,1\}$$

каде  $u$  претставува состојба на ангажираната термоелектрана, а критериумската функција има неконвексна форма, односно:

#### 7.4.2.2 Ограничувања

Оптимизациониот проблем SHTWS моделиран со АС модел, овозможува уважување поголем број ограничувања споредбено со DC моделот, како на пример ограничување за напоните на јазлите, реактивната моќност на генераторите, реактивната моќност на кондензаторските батерии итн. Според тоа, ограничувањата коишто се претходно моделирани и елаборирани во фаза 2 и во DC моделот ќе бидат прикажан само со соодветниот израз. Од друга страна, новите т.е. дополнителните ограничувања кои го карактеризираат АС моделот, ќе бидат детално прикажани.

##### 7.4.2.2.1 Генераторско ограничување за активната моќност

$$u_{t,j} P_{GT,t}^{\min} \leq P_{GT,t,j} \leq u_{t,j} P_{GT,t}^{\max} \quad (7.62)$$

$$u_{h,j} P_{GH,h}^{\min} \leq P_{GH,h,j} \leq u_{h,j} P_{GH,h}^{\max}$$

##### 7.4.2.2.2 Генераторско ограничување за реактивната моќност

$$u_{t,j} Q_{GT,t}^{\min} \leq Q_{GT,t,j} \leq u_{t,j} Q_{GT,t}^{\max} \quad (7.63)$$

$$u_{h,j} Q_{GH,h}^{\min} \leq Q_{GH,h,j} \leq u_{h,j} Q_{GH,h}^{\max}$$

каде што  $Q_{GT,t,j}$  и  $Q_{GH,h,j}$  респективно претставуваат реактивна моќност термоелектраната  $t$ , односно хидроелектраната  $h$ , во интервалот  $j$  [72].

##### 7.4.2.2.3 Ограничување за биланс на моќности

Ограничувањето за биланс на моќности имплицитно се уважува со самото воведување на ограничувањето за текови на активна и реактивна моќност во секој јазол (што се базира на изразите (4.66) и (4.67)), т.е.:

$$\begin{aligned}
 P_{Gm,j} - P_{Lm,j} &= U_{m,j} \sum_{n=1}^{NB} U_{n,j} \left[ G_{mn} \cos(\theta_{m,j} - \theta_{n,j}) + B_{mn} \sin(\theta_{m,j} - \theta_{n,j}) \right] \\
 Q_{Gm,j} + Q_{Sm,j} - Q_{Lm,j} &= U_{m,j} \sum_{n=1}^{NB} U_{n,j} \left[ G_{mn} \sin(\theta_{m,j} - \theta_{n,j}) - B_{mn} \cos(\theta_{m,j} - \theta_{n,j}) \right] \quad (7.64) \\
 m &= 1, \dots, NB; \quad n = 1, \dots, NB; \quad j = 1, \dots, J;
 \end{aligned}$$

каде што  $NB$  претставува вкупен број јазли во системот, а  $J$  вкупен број временски интервали на оптимизациониот период.

#### 7.4.2.2.4 Ограничување за ротирачка резерва

$$R = \sqrt{a_{res} \cdot P_{P,max} + b_{res}^2} - b_{res}; \quad a_{res} = 10 \text{ MW}; \quad b_{res} = 150 \text{ MW} \quad (7.65)$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{t=1}^{NT} u_{t,j} (P_{GT,t}^{\max} - P_{GT,t,j}) + \sum_{h=1}^{NH} u_{h,j} (P_{GH,h}^{\max} - P_{GH,h,j}) &\geq P_{P,j} + P_{L,j} + R_T + R_H \\
 \forall j \in J
 \end{aligned} \quad (7.66)$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{t=1}^{NT} u_{t,j} P_{GT,t}^{SR} &\geq R_T \\
 \sum_{h=1}^{NH} u_{h,j} P_{GH,h}^{SR} &\geq R_H
 \end{aligned} \quad (7.67)$$

#### 7.4.2.2.5 Ограничување за брзината на промена на моќноста на генераторите (ramp rate)

$$\begin{aligned}
 P_{GT,t,j} &= \max \left( P_{GT,t}^{\min}, (P_{GT,t,j} - DRT_t) \right) \\
 P_{GH,h,j} &= \max \left( P_{GH,h}^{\min}, (P_{GH,h,j} - DRH_h) \right) \\
 P_{GT,t,j} &= \min \left( P_{GT,t}^{\max}, (P_{GT,t,j} + URT_t) \right) \\
 P_{GH,h,j} &= \min \left( P_{GH,h}^{\max}, (P_{GH,h,j} + URH_h) \right)
 \end{aligned} \quad (7.68)$$

#### 7.4.2.2.6 Ограничување за преносната моќ на водовите

Привидната моќност низ преносниот вод, во текот на целиот оптимизационен период, не смее да биде поголема од максимално дозволената [72]:

$$S_{GRg,j} \leq S_{GRg}^{\max}; \quad g = 1, \dots, G \quad (7.69)$$

каде што

$$S_{GRg} = \max \left\{ |S_{ij}|, |S_{ji}| \right\} \quad (7.70)$$

#### 7.4.2.2.7 Ограничување за расположлив волумен на вода

$$\sum_{j=1}^J Q_{t,h,j} \cdot T_j \leq V_{h,k} \quad (7.71)$$

$$Q_{t,h}(P_{GH,h}) = \alpha_h + \beta_h \cdot P_{GH,h} + \gamma_h \cdot P_{GH,h}^2 \quad (7.72)$$

## 7.4.2.2.8 Ограничување за расположливото производство

$$\sum_{i=1}^{NT+NH} P_{Gi,j} \cdot T_j = W_{\max,i} \quad (7.73)$$

$$Q_{\max,h} = Q_{ins,h} = f(\alpha_h, \beta_h, \gamma_h, P_{GH,h}^{\max}) \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (7.74)$$

$$T_{pr,h} = \frac{V_{k,h}}{Q_{\max,h}} \quad [\text{h}] \quad (7.75)$$

$$W_{\max,h} = P_{GHh}^{\max} \cdot T_{pr,h} \quad [\text{MWh}] \quad (7.76)$$

## 7.4.2.2.9 Ограничување за биланс на водниот потенцијал

$$V_{h,j} = V_{h,(j-1)} + Q_{d,h,j} - Q_{t,h,j} - Q_{p,h,j} \quad (7.77)$$

## 7.4.2.2.10 Ограничување за почетен и краен волумен на вода во акумулациите

$$\begin{aligned} V_{h,0} &= V_h^{\text{start}} \\ V_{h,24} &= V_h^{\text{end}} \end{aligned} \quad (7.78)$$

## 7.4.2.2.11 Ограничување за проток на вода низ турбината

$$Q_h^{\min} \leq Q_{h,j} \leq Q_h^{\max} \quad (7.79)$$

## 7.4.2.2.12 Ограничување за волуменот на вода во акумулациите

$$V_h^{\min} \leq V_{h,j} \leq V_h^{\max} \quad (7.80)$$

## 7.4.2.2.13 Ограничување за напонот на генераторите

Излезните напони на генераторите т.е. PU јазлите (меѓу кои и оној на slack јазлот), мора да биде во рамките на дозволеният интервал, т.е. [72]:

$$U_{Gi}^{\min} \leq U_{Gi,j} \leq U_{Gi}^{\max}; i = 1, \dots, NT + NH \quad (7.81)$$

## 7.4.2.2.14 Ограничување за напонот на јазлите на потрошувачите

Од аспект на сигурност, идентично како кај напоните на генераторите, напоните на јазлите на потрошувачите (PQ јазли), мора да бидат во дозволеният интервал, т.е. [72]:

$$U_l^{\min} \leq U_{l,j} \leq U_l^{\max}; l = 1, \dots, NL \quad (7.82)$$

#### 7.4.2.2.15 Ограничување за реактивната моќност на компензаторите

Генерираната реактивна моќност од страна на компензаторите, за потребите на OPF, е ограничена со својот технички минимум и технички максимум, односно [72]:

$$Q_s^{\min} \leq Q_{s,j} \leq Q_s^{\max}; s = 1, \dots, NS \quad (7.83)$$

#### 7.4.2.3 Контролни, состојбени и зависни променливи

Векторот на контролни променливи е прикажан со изразот (7.84), а се состои од моќностите на генераторите, освен моќноста на slack генераторот (што се наоѓа во јазолот 1), напоните на генераторите, како и реактивната моќност на компензаторите. Контролните променливи претставуваат влезни променливи во пресметката на тековите на моќност, кај која пресметката на напоните во овој труд се врши со помош на методот на Newton-Raphson, кој е детално прикажан во поглавје 4. Имајќи предвид дека бројот на интервали е  $J = 24$ , вкупниот број контролни променливи за овој оптимизационен проблем изнесува:

$$N_{\text{var}} = (NT + NH - 1) \cdot J + (NT + NH) \cdot J + NS \cdot J = 5 \cdot 24 + 6 \cdot 24 + 2 \cdot 24 = 312$$

Како резултат од пресметката на напоните се добива векторот на состојбени променливи, кој се состои од ефективните вредности на напоните на PQ јазлите и фазните агли на сите NB-1 јазли, освен на slack јазолот. Векторот на состојбени променливи е прикажан со изразот (7.85).

На крај, по пресметката на сите напони со методот на Newton-Raphson, се добива векторот на зависни променливи. Тој се состои од активната моќност на slack генераторот, реактивните моќности на генераторите т.е. PU јазлите меѓу кои и slack јазолот, како и привидните моќности на двата краја на сите преносни водови, а е прикажан со изразот (7.86).

$$\mathbf{x} = \{P_{G,2}, \dots, P_{G,NT+NH}, U_{G,1}, \dots, U_{G,NT+NH}, Q_{S,1}, \dots, Q_{S,NS}\} \quad (7.84)$$

$$\mathbf{u} = \{U_1, \dots, U_{NL}, \theta_2, \dots, \theta_{NB}\} \quad (7.85)$$

$$\mathbf{y} = \{P_{G,1}, Q_{G,1}, \dots, Q_{G,NT+NH}, S_{GR,g}, \dots, S_{GR,G}\} \quad (7.86)$$

### 7.4.3 Примена на реално-кодиран NSAGA за решавање на потпроблемот SHTWS моделиран со AC модел

Во предложениот алгоритам, потпроблемот SHTWS со AC модел се решава со новопредложен реално-кодиран NSAGA т.е. со програмата „realen\_ga\_ac.m“, која е изработена во програмскиот пакет MATLAB. Во ова потпоглавје ќе биде прикажан и елабориран алгоритмот со AC модел, за решавање на потпроблемот SHTWS.

Неопходните влезни параметри се содржат во структурата со податоци, која се нарекува „parametri\_ees\_ac.m“, а таа се вчитува при самиот старт на алгоритмот. Истата во себе содржи податоци за генераторите во термоелектраните и хидроелектраните, податоци за дневниот дијаграм на оптоварување (параметри на јазлите за секој интервал) и дијаграмот на производство на ветерната електрана (чијашто излезна моќност е интегрирана во структурата со податоци за јазлите за секој интервал), податоци за јазлите и водовите на преносната мрежа, податоци за компензаторите за секој интервал,

како и податоци со расположливиот волумен на вода кај хидроелектраните. Со други зборови, се внесуваат параметри за системот кој треба да се оптимизира, на пример IEEE14, IEEE30 итн.

Излезни параметри од програмата се структурите со пресметка на тековите на моќности и загубите во мрежа за секој период, векторот PG и QG со активните и реактивните моќности на генераторите, вредноста на критериумската функцијата F за добиеното оптимално решение, загубите во системот, протокот на вода низ турбините, волуменот на вода во акумулациите за секој интервал, моќноста низ преносните водови, напоните на генераторите, напоните на јазлите, реактивната моќност на компензаторите итн.

Со цел „корекција“ на хромозомите т.е. нивно враќање во рамките на допустливиот простор, а со тоа и добивање глобално оптимално решение, за решавање на проблемот SHTWS со AC модел, предложени се неколку нови механизми за справување со ограничувањата т.е. RM, а се прикажани во алгоритам 13, 14 и 15. Алгоритмот за решавање на потпроблемот SHTWS моделиран со AC модел, со помош на новопредложениот реално-кодирани NSAGA, се состои од низа чекори, односно:

**Чекор 1:** Вчитување на влезните параметри од датотеката со структура на податоци „parametri\_ees\_ac.m“.

**Чекор 2:** Иницијализација т.е. формирање почетна прелиминарна популација со големина 200 од реално-кодирани хромозоми, врз основа на добиеното оптимално решение од фаза 2. Моделирањето на делот од хромозомот што се однесува за моќноста на генераторите, се врши во согласност со изразот [69]:

$$\begin{aligned} P_{G0,m}^a &= (1-\psi) \cdot P_{GUC,m} \\ P_{G0,m}^b &= (1+\psi) \cdot P_{GUC,m} \\ P_{n,m} &= P_{G0,m}^a + rand \cdot (P_{G0,m}^b - P_{G0,m}^a), \\ n &= 1, \dots, N_{pop}, \\ m &= 1, \dots, N_{var} = (NT + NH) \cdot J \end{aligned} \quad (7.87)$$

каде што  $\psi$  претставува фактор на диверзитет, а има вредност 0.3.

Делот од хромозомот на почетната популација што се однесува за напоните на генераторите, е моделиран во согласност со следниот израз [72]:

$$\begin{aligned} U_{n,m} &= U_m^{\min} + (n-1) \cdot \frac{U_m^{\max} - U_m^{\min}}{N_{pop} - 1}; \\ n &= 1, \dots, N_{pop}; \\ m &= 1, \dots, N_{var} = (NT + NH) \cdot J \end{aligned} \quad (7.88)$$

Делот од хромозомот на почетната популација, во кој се сместени реактивните моќности на компензаторите, е моделиран според униформна распределба т.е.:

$$\begin{aligned} Q_{Sn,m} &= rand(Q_{Sm}^{\min}, Q_{Sm}^{\max}); \\ n &= 1, \dots, N_{pop}; \\ m &= 1, \dots, NS \cdot J \end{aligned} \quad (7.89)$$

**Чекор 3:** Пресметка на вредноста на fitness функцијата во согласност со изразот:



$$F(x) = \begin{cases} f(x) & \text{ако } x \text{ е допустливо} \\ f_{\max} + \left[ \sum_{i=1}^I \langle g_i(x) \rangle + \sum_{j=1}^J |h_j(x)| \right] & \text{ако } x \text{ е недопустливо} \end{cases} \quad (7.90)$$

како и пресметка на параметрот  $osv$  во согласност со изразите (6.37) и (6.38).

**Чекор 4:** Примена на техниката SF, елаборирана во потпоглавјето 6.11.1. Избор на најдобрите 100 хромозоми од прелиминарната почетна популација и формирање финална почетна популација, за потребите на генетската пресметка. Ваквата манипулација е со цел зголемување на робусноста на алгоритмот, но и задржување на квалитетот на почетната популација.

**Чекор 5:** Давање вредност 1 на бројот на генерација, т.е.  $gen = 1$ . Подесување на вредноста на параметрите за техниката SR, т.е.  $p_{f,1} = 0.475$ , односно  $p_{f,ngen} = 0.025$ .

**Чекор 6:** Креирање while циклус за започнување на главната генетска пресметка, со два паралелни услови за запирање на алгоритмот, т.е. максимален број генерации и дадена толеранција на отстапување на вредноста на fitness функцијата на хромозомот од средната вредност на fitness функцијата на тековната популација.

**Чекор 7:** Промена на вредноста на параметрите за техниката SR, т.е.  $p_{f,gen}$ , зависно од индексот на тековната генерација  $gen$ .

**Чекор 8:** Пресметка на вредноста на fitness функцијата со примена на техниката self-adaptive penalty factor во согласност со изразот (6.46), како и пресметка на параметрот  $osv$  со примена на изразите (6.37) и (6.38).

**Чекор 9:** Примена на linear ranking selection за хромозомите од главната популација, односно tournament selection ( $k = 2, 3, 4, \dots, N$ ) за хромозомите потомци во споредната (trial) популација.

**Чекор 10:** Во оваа докторска дисертација во AC моделот, за операторот вкрстување (во комбинација со adaptive crossover strategy според изразот (6.47)), за добивање на хромозомите потомци во главната популација, е предложен нов пристап кој има за цел одржување на диверзитетот т.е. разноликоста на популацијата, односно спречување алгоритмот да заглави во локален оптимум, имајќи го предвид значително поголемиот број контролни променливи. Ваквиот пристап се состои во тоа што на операторот вкрстување му се задава стохастичка природа т.е. Stochastic Crossover (SX). Со други зборови, зависно од вредноста на генериран рамномерно распределен случаен број  $r \in [0, 1]$ , се избира еден од типовите на вкрстување, односно Laplace Crossover (LX), Heuristic crossover (HX) и Simulated Binary Crossover (SBX), на следниот начин:

$$SX = \begin{cases} (LX), & \text{ако } 0 \leq r < 1/3 \\ (HX), & \text{ако } 1/3 \leq r < 2/3 \\ (SBX), & \text{ако } 2/3 \leq r \leq 1 \end{cases} \quad (7.91)$$

Примена на Logistic distribution-based crossover (LogX), во комбинација со adaptive crossover strategy според изразот (6.47), за добивање на хромозомите потомци во споредната (trial) популација.

**Чекор 11:** Примена на Makinen, Periaux and Toivanen mutation (MPTM) според изразот (6.34), во комбинација со adaptive mutation strategy според изразот (6.48), за

мутација на хромозмите потомци во главната популација. Примена на Polynomial mutation (PM) според изразот (6.31), за мутација на хромозмите потомци во споредната (trial) популација.

**Чекор 12:** Пресметка на вредноста на fitness функцијата на хромозомите од главната популација и trial популацијата, со примена на техниката self-adaptive penalty factor во согласност со изразот (6.46), како и пресметка на параметрот  $ocv$  со примена на изразите (6.37) и (6.38).

**Чекор 13:** Примена на техниката SR, којашто е прикажана во алгоритам 9. Замена на хромозомот  $y_n$  од главната популација, со хромозомот  $y_{trial,n}$  од trial популацијата за следната генерација, ако хромозомот  $y_{trial,n}$  од trial популацијата е подобар од хромозомот  $y_n$  од главната популација, во согласност со условите за техниката SR, прикажана во потпоглавјето 6.11.2.

**Чекор 14:** Креирање комбинирана популација од хромозоми родители и хромозоми деца. Пресметка на fitness функцијата, а следствено и нивно рангирање, како и избор на половина од хромозомите со најдобра релативна fitness функција за формирање на наредна генерација.

**Чекор 15:** Примена на новопредложените RM, што се прикажани во алгоритам 10, 11, 13, 14, 15

---

**Алгоритам 13** Псевдо-код на новопредложен RM за справување со техничките граници на реактивните моќности и напоните на генераторите

---

1. **for**  $i = 1 : (NT + NH)$ 
  - a. **for**  $j = 1 : ND$ 
    - i. **if**  $Q_{Gi,j} < Q_{Gi}^{\min}$ 
      1.  $Q_{Gi,j} = Q_{Gi}^{\min}$
    - ii. **elseif**  $Q_{Gi,j} > Q_{Gi}^{\max}$ 
      1.  $Q_{Gi,j} = Q_{Gi}^{\max}$
    - iii. **end**
  - b. **end**
2. **end**
3. **for**  $i = 1 : (NT + NH)$ 
  - a. **for**  $j = 1 : ND$ 
    - i. **if**  $U_{Gi,j} < U_{Gi}^{\min}$ 
      1.  $U_{Gi,j} = (U_{Gi,j} + U_{Gi}^{\min}) / 2$
    - ii. **elseif**  $U_{Gi,j} > U_{Gi}^{\max}$ 
      1.  $U_{Gi,j} = (U_{Gi,j} + U_{Gi}^{\max}) / 2$
    - iii. **end**
  - b. **end**
4. **end**

---

**Алгоритам 14** Псевдо-код на новопредложен RM за справување со ramp rate ограничувањето на генераторите

---

```

1. for  $i = 1: NH$ 
  a. for  $j = 1: J$ 
    i. if  $P_{GH}(i, j) \neq 0$ 
      1. if  $P_{GH}(i, j) \leq \max(P_{GH}^{\min}(i), (P_{GH}(i, j) - DRH(i)))$ 
        a.  $P_{GH}(i, j) = \max(P_{GH}^{\min}(i), (P_{GH}(i, j) - DRH(i)))$ 
      2. elseif  $P_{GH}(i, j) \geq \min(P_{GH}^{\max}(i), (P_{GH}(i, j) + URH(i)))$ 
        a.  $P_{GH}(i, j) = \min(P_{GH}^{\max}(i), (P_{GH}(i, j) + URH(i)))$ 
      3. end
    ii. end
  b. end
2. end
3. for  $i = 1: NT$ 
  a. for  $j = 1: J$ 
    i. if  $P_{GT}(i, j) \neq 0$ 
      1. if  $P_{GT}(i, j) \leq \max(P_{GT}^{\min}(i), (P_{GT}(i, j) - DRT(i)))$ 
        a.  $P_{GT}(i, j) = \max(P_{GT}^{\min}(i), (P_{GT}(i, j) - DRT(i)))$ 
      2. elseif  $P_{GT}(i, j) \geq \min(P_{GT}^{\max}(i), (P_{GT}(i, j) + URT(i)))$ 
        a.  $P_{GT}(i, j) = \min(P_{GT}^{\max}(i), (P_{GT}(i, j) + URT(i)))$ 
      3. end
    ii. end
  b. end
4. end

```

**Алгоритам 15** Псевдо-код на новопредложен RM за справување со ограничувањето за реактивната моќност на компензаторите

```

1. for  $s = 1: NS$ 
  a. for  $j = 1: ND$ 
    i. if  $Q_{s,j} < Q_s^{\min}$ 
      1.  $Q_{s,j} = Q_s^{\min}$ 
    ii. elseif  $Q_{s,j} > Q_s^{\max}$ 
      1.  $Q_{s,j} = Q_s^{\max}$ 
    iii. end
  b. end
2. end

```

---

**Алгоритам 16** Псевдо-код на новопредложен RM за справување со ограничувањето за напоните на PQ јазлите
 

---

```

1. for  $l=1:NL$ 
  a. for  $j=1:ND$ 
    i. if  $U_{l,j} < U_l^{\min}$ 
      1.  $U_{l,j} = U_l^{\min}$ 
    ii. elseif  $U_{l,j} > U_l^{\max}$ 
      1.  $U_{l,j} = U_l^{\max}$ 
    iii. end
  b. end
2. end

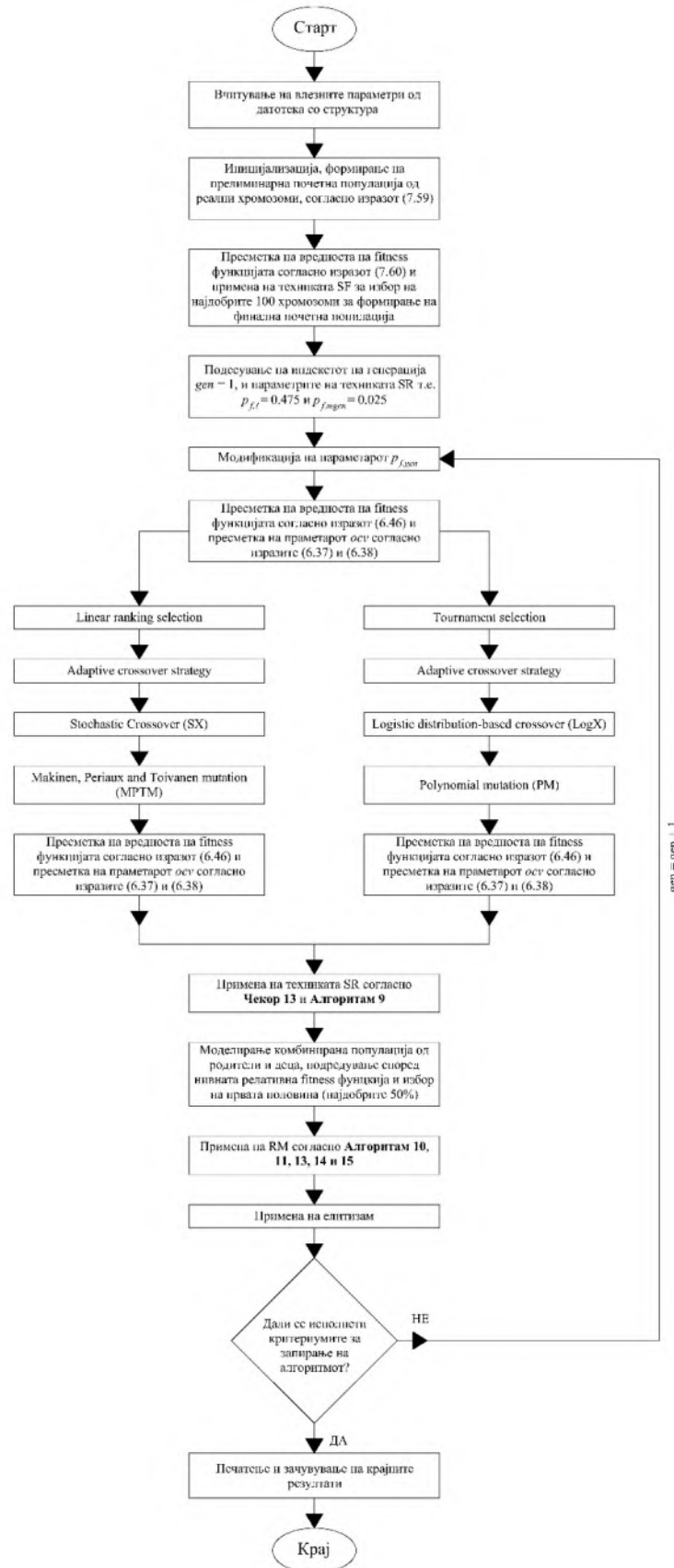
```

---

**Чекор 16:** Примена на елитизам, односно реизбор на одреден број елитни единки коишто нема да подлежат на вкрстување и мутација.

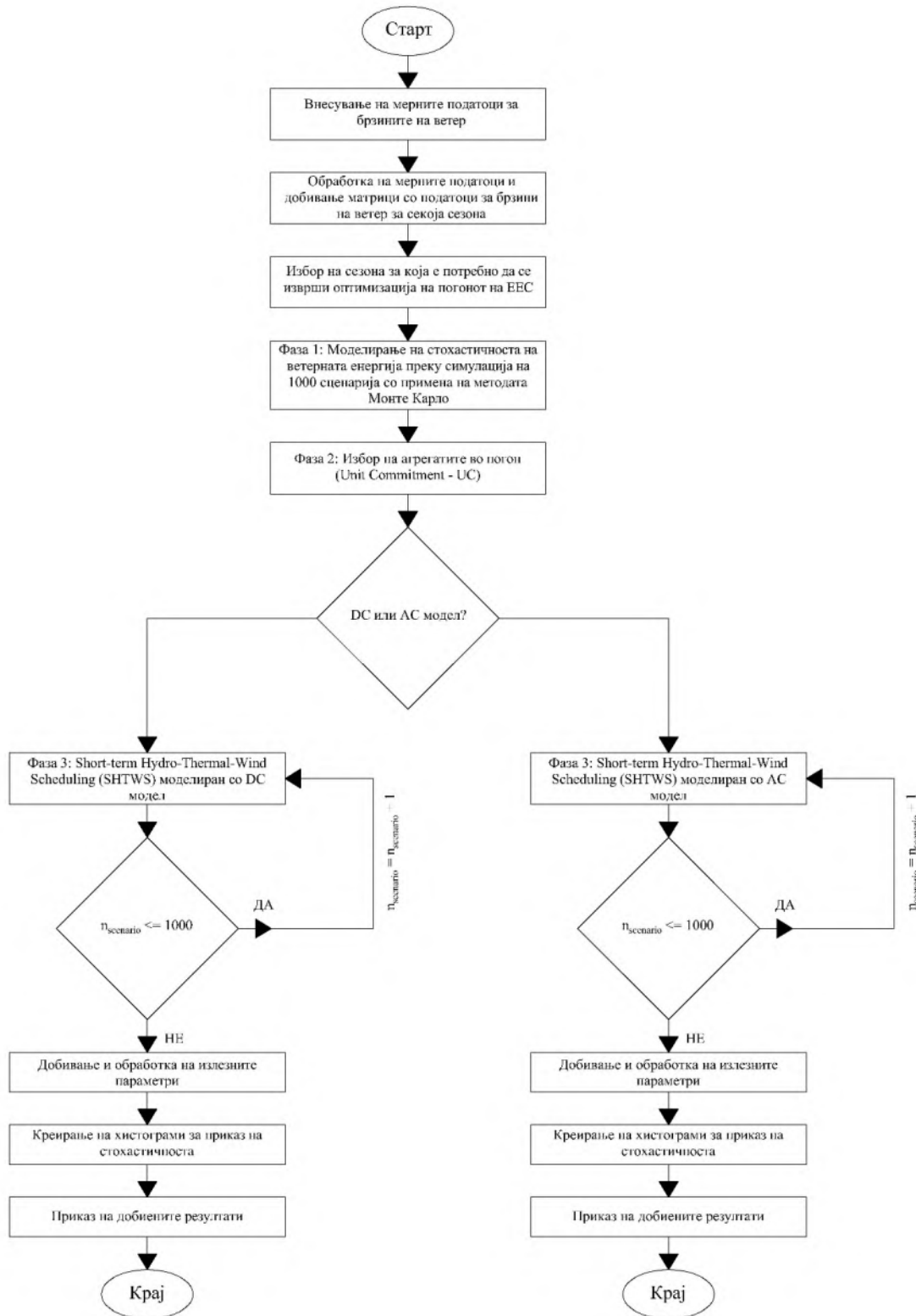
**Чекор 17:** Проверка на условите за запирање на алгоритмот од **Чекор 6**. Во случај да бидат исполнети, се врши затворање на while циклусот т.е. запирање на алгоритмот и зачувување на добиеното оптимално решение (со првично уважените ограничувања). Ако не се исполнети условите од **Чекор 6**, следува повторување на **Чекорите 7 - 16**.

На слика 7.5 е прикажан дијаграмот на тек т.е. блок дијаграмот на предложениот алгоритам од фаза 3, со примена на AC модел.



Слика 7.5 Дијаграм на тек на фаза 3 (АС модел) од предложениот алгоритам за оптимизација на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори

За добивање појасна слика за предложениот алгоритам на оваа докторска дисертација, неговиот дијаграм на тек т.е. блок дијаграмот (со сите три фази кои претходно беа детално елаборирани) е прикажан на слика 7.6.



Слика 7.6 Дијаграм на тек на предложениот алгоритам за оптимизација на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори

**РЕЗУЛТАТИ ОД  
ОПТИМИЗАЦИЈАТА НА  
ПОГОНОТ НА ЕЕС  
СОСТАВЕН ОД  
КЛАСИЧНИ И  
ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ  
СО ПРИМЕНА  
НА NSAGA**

Поглавје

8

## 8 РЕЗУЛТАТИ ОД ОПТИМИЗАЦИЈАТА НА ПОГОНОТ НА ЕЕС СОСТАВЕН ОД КЛАСИЧНИ И ОБНОВЛИВИ ИЗВОРИ СО ПРИМЕНА НА NSAGA

### 8.1 РЕЗУЛТАТИ ОД МОДЕЛИРАЊЕТО НА СТОХАСТИЧНОСТА НА ВЕТЕРНАТА ЕНЕРГИЈА

#### 8.1.1 Резултати од пресметката на параметрите на Weibull-овата функција на густина на веројатност

Програмите „metod\_na\_newton\_weibull\_parametar.m“ и „brzini\_veter\_sezona.mat“, се моделирани во програмскиот пакет Matlab, а беа детално елаборирани во потпоглавјето 7.1. Во ова поглавје тие ќе бидат применети на реални податоци, односно тестирани со веќе постоечка функција mle (maximum likelihood estimates) во Matlab, којашто се применува за пресметка на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност.

Пресметката е извршена врз основа на претходно измерени брзини на ветер за ветерната електрана Богданци, Република Македонија, а во тек на истражувањето за оваа докторска дисертација, се покажа дека тие можат лесно да се интегрираат во IEEE 30 bus системот, т.е. системот на којшто ќе биде применет предложениот NSAGA.

Потребно е да се определат параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност, односно коефициентот на облик  $k_{wei}$  и коефициентот на скалирање  $c_{wei}$ , во согласност со новопредложениот maximum likelihood method (метод на максимална веројатност), кој ќе биде применет за поставување на равенката (2.34). Од друга страна, равенката (2.34) се решава итеративно со методот на Newton и потоа од добиеното решение да се определи коефициентот на скалирање  $c_{wei}$ , со примена на равенството (2.35). За почетно решение на методот на Newton е применет изразот (2.37), а вредноста на отстапувањето е подесена на  $\Delta k = 10^{-6}$ . Итеративната постапка за пресметка на сезонските параметри на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност, т.е. за сезоните пролет, лето, есен, зима респективно е прикажана во табелите 8.1, 8.3, 8.5 и 8.7. На сликата 8.1 е прикажан пример од излезните параметри од моделираната програма „metod\_na\_newton\_weibull\_parametar.m“.

#### Metod na Newton

```
Njutnoviot algoritam konvergirase kon resenieto
```

```
Resenieto na ravenkata maximum likelihood method (koeficientot na oblik k) e :  
1.7598
```

```
Resenieto e pronajdeno po 42 iteracii.
```

```
Soglasno dobieniot koeficient na oblik k, koeficientot na skaliranje c, e :  
7.0281
```

Слика 8.1 Приказ на излезните параметри од моделираната програма „metod\_na\_newton\_weibull\_parametar.m“ во Matlab (за сезона пролет)



Табела 8.1 Итеративна постапка за пресметка на сезонските вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната пролет со метод на Newton

Итерација бр.	$\Delta k_{wei}$	Итерација бр.	$\Delta k_{wei}$
1	$1.279922 \cdot 10^0$	22	$8.389278 \cdot 10^{-4}$
2	$7.961663 \cdot 10^{-1}$	23	$5.946814 \cdot 10^{-4}$
3	$6.048409 \cdot 10^{-1}$	24	$4.214883 \cdot 10^{-4}$
4	$4.039483 \cdot 10^{-1}$	25	$2.987640 \cdot 10^{-4}$
5	$2.970111 \cdot 10^{-1}$	26	$2.117589 \cdot 10^{-4}$
6	$2.045838 \cdot 10^{-1}$	27	$1.500983 \cdot 10^{-4}$
7	$1.477792 \cdot 10^{-1}$	28	$1.063886 \cdot 10^{-4}$
8	$1.032820 \cdot 10^{-1}$	29	$7.540931 \cdot 10^{-5}$
9	$7.391556 \cdot 10^{-2}$	30	$5.344996 \cdot 10^{-5}$
10	$5.202609 \cdot 10^{-2}$	31	$3.788568 \cdot 10^{-5}$
11	$3.705650 \cdot 10^{-2}$	32	$2.685339 \cdot 10^{-5}$
12	$2.617401 \cdot 10^{-2}$	33	$1.903381 \cdot 10^{-5}$
13	$1.859788 \cdot 10^{-2}$	34	$1.349119 \cdot 10^{-5}$
14	$1.315914 \cdot 10^{-2}$	35	$9.562609 \cdot 10^{-6}$
15	$9.338785 \cdot 10^{-3}$	36	$6.778000 \cdot 10^{-6}$
16	$6.613537 \cdot 10^{-3}$	37	$4.804269 \cdot 10^{-6}$
17	$4.690612 \cdot 10^{-3}$	38	$3.405279 \cdot 10^{-6}$
18	$3.323251 \cdot 10^{-3}$	39	$2.413672 \cdot 10^{-6}$
19	$2.356267 \cdot 10^{-3}$	40	$1.710817 \cdot 10^{-6}$
20	$1.669759 \cdot 10^{-3}$	41	$1.212633 \cdot 10^{-6}$
21	$1.183716 \cdot 10^{-3}$	42	$8.595176 \cdot 10^{-7}$

Сезонските вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност, т.е. за сезоните пролет, лето, есен и зима, како и нивната споредба со добиените резултати од интегрираната функција mle во Matlab, а со цел увид во точноста на предложениот алгоритам, респективно се прикажани во Табелите 8.2, 8.4, 8.6 и 8.8.

Табела 8.2 Сезонски вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната пролет и нивна споредба со функцијата mle во Matlab

	Коефициент на облик $k_{wei}$	Коефициент на скалирање $c_{wei}$
Метод на Newton	1.7598	7.0281
mle (Matlab)	1.7598	7.0281
отстапување [%]	0	0

Табела 8.3 Итеративна постапка за пресметка на сезонските вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната лето со метод на Newton

Итерација бр.	$\Delta k_{wei}$	Итерација бр.	$\Delta k_{wei}$
1	$1.258590 \cdot 10^0$	27	$9.011576 \cdot 10^{-4}$
2	$8.565730 \cdot 10^{-1}$	28	$6.845090 \cdot 10^{-4}$
3	$6.897938 \cdot 10^{-1}$	29	$5.200082 \cdot 10^{-4}$
4	$4.949313 \cdot 10^{-1}$	30	$3.950038 \cdot 10^{-4}$
5	$3.895525 \cdot 10^{-1}$	31	$3.000701 \cdot 10^{-4}$
6	$2.868300 \cdot 10^{-1}$	32	$2.279402 \cdot 10^{-4}$
7	$2.225453 \cdot 10^{-1}$	33	$1.731557 \cdot 10^{-4}$
8	$1.661242 \cdot 10^{-1}$	34	$1.315344 \cdot 10^{-4}$
9	$1.277749 \cdot 10^{-1}$	35	$9.991994 \cdot 10^{-5}$
10	$9.610422 \cdot 10^{-2}$	36	$7.590269 \cdot 10^{-5}$
11	$7.353688 \cdot 10^{-2}$	37	$5.765912 \cdot 10^{-5}$
12	$5.554545 \cdot 10^{-2}$	38	$4.380003 \cdot 10^{-5}$
13	$4.237301 \cdot 10^{-2}$	39	$3.327240 \cdot 10^{-5}$
14	$3.208357 \cdot 10^{-2}$	40	$2.527501 \cdot 10^{-5}$
15	$2.443163 \cdot 10^{-2}$	41	$1.919997 \cdot 10^{-5}$
16	$1.852451 \cdot 10^{-2}$	42	$1.458506 \cdot 10^{-5}$
17	$1.409188 \cdot 10^{-2}$	43	$1.107942 \cdot 10^{-5}$
18	$1.069322 \cdot 10^{-2}$	44	$8.416372 \cdot 10^{-6}$
19	$8.129643 \cdot 10^{-3}$	45	$6.393425 \cdot 10^{-6}$
20	$6.171766 \cdot 10^{-3}$	46	$4.856704 \cdot 10^{-6}$
21	$4.690538 \cdot 10^{-3}$	47	$3.689352 \cdot 10^{-6}$
22	$3.561845 \cdot 10^{-3}$	48	$2.802582 \cdot 10^{-6}$
23	$2.706460 \cdot 10^{-3}$	49	$2.128956 \cdot 10^{-6}$
24	$2.055512 \cdot 10^{-3}$	50	$1.617241 \cdot 10^{-6}$
25	$1.561696 \cdot 10^{-3}$	51	$1.228522 \cdot 10^{-6}$
26	$1.186187 \cdot 10^{-3}$	52	$9.332356 \cdot 10^{-7}$

Табела 8.4 Сезонски вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната лето и нивна споредба со функцијата mle во Matlab

	Коефициент на облик $k_{wei}$	Коефициент на скалирање $c_{wei}$
Метод на Newton	1.7879	6.9453
mle (Matlab)	1.7879	6.9453
отстапување [%]	0	0

Табела 8.5 Итеративна постапка за пресметка на сезонските вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната есен со метод на Newton

Итерација бр.	$\Delta k_{wei}$	Итерација бр.	$\Delta k_{wei}$
1	$1.033333 \cdot 10^0$	31	$8.109155 \cdot 10^{-4}$
2	$7.356752 \cdot 10^{-1}$	32	$6.410478 \cdot 10^{-4}$
3	$6.128676 \cdot 10^{-1}$	33	$5.068249 \cdot 10^{-4}$
4	$4.573362 \cdot 10^{-1}$	34	$4.006672 \cdot 10^{-4}$
5	$3.742957 \cdot 10^{-1}$	35	$3.167689 \cdot 10^{-4}$
6	$2.861030 \cdot 10^{-1}$	36	$2.504236 \cdot 10^{-4}$
7	$2.313289 \cdot 10^{-1}$	37	$1.979833 \cdot 10^{-4}$
8	$1.792173 \cdot 10^{-1}$	38	$1.565185 \cdot 10^{-4}$
9	$1.437415 \cdot 10^{-1}$	39	$1.237415 \cdot 10^{-4}$
10	$1.122425 \cdot 10^{-1}$	40	$9.782622 \cdot 10^{-5}$
11	$8.955237 \cdot 10^{-2}$	41	$7.733980 \cdot 10^{-5}$
12	$7.026084 \cdot 10^{-2}$	42	$6.114268 \cdot 10^{-5}$
13	$5.586865 \cdot 10^{-2}$	43	$4.833825 \cdot 10^{-5}$
14	$4.396053 \cdot 10^{-2}$	44	$3.821496 \cdot 10^{-5}$
15	$3.488082 \cdot 10^{-2}$	45	$3.021197 \cdot 10^{-5}$
16	$2.749520 \cdot 10^{-2}$	46	$2.388483 \cdot 10^{-5}$
17	$2.178675 \cdot 10^{-2}$	47	$1.888284 \cdot 10^{-5}$
18	$1.719266 \cdot 10^{-2}$	48	$1.492831 \cdot 10^{-5}$
19	$1.361158 \cdot 10^{-2}$	49	$1.180200 \cdot 10^{-5}$
20	$1.074874 \cdot 10^{-2}$	50	$9.330380 \cdot 10^{-6}$
21	$8.505324 \cdot 10^{-3}$	51	$7.376390 \cdot 10^{-6}$
22	$6.719332 \cdot 10^{-3}$	52	$5.831602 \cdot 10^{-6}$
23	$5.315127 \cdot 10^{-3}$	53	$4.610333 \cdot 10^{-6}$
24	$4.200151 \cdot 10^{-3}$	54	$3.644823 \cdot 10^{-6}$
25	$3.321707 \cdot 10^{-3}$	55	$2.881514 \cdot 10^{-6}$

26	$2.625337 \cdot 10^{-3}$	56	$2.278058 \cdot 10^{-6}$
27	$2.075986 \cdot 10^{-3}$	57	$1.800981 \cdot 10^{-6}$
28	$1.640942 \cdot 10^{-3}$	58	$1.423814 \cdot 10^{-6}$
29	$1.297469 \cdot 10^{-3}$	59	$1.125635 \cdot 10^{-6}$
30	$1.025638 \cdot 10^{-3}$	60	$8.899012 \cdot 10^{-7}$

Табела 8.6 Сезонски вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната есен и нивна споредба со функцијата mle во Matlab

	Коефициент на облик $k_{wei}$	Коефициент на скалирање $c_{wei}$
Метод на Newton	1.4376	6.5513
mle (Matlab)	1.4376	6.5513
отстапување [%]	0	0

Табела 8.7 Итеративна постапка за пресметка на сезонските вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната зима со метод на Newton

Итерација бр.	$\Delta k_{wei}$	Итерација бр.	$\Delta k_{wei}$
1	$1.375019 \cdot 10^0$	11	$3.144770 \cdot 10^{-4}$
2	$4.188136 \cdot 10^{-1}$	12	$1.401812 \cdot 10^{-4}$
3	$2.106479 \cdot 10^{-1}$	13	$6.249549 \cdot 10^{-5}$
4	$8.829808 \cdot 10^{-2}$	14	$2.786004 \cdot 10^{-5}$
5	$4.039131 \cdot 10^{-2}$	15	$1.242013 \cdot 10^{-5}$
6	$1.779503 \cdot 10^{-2}$	16	$5.536887 \cdot 10^{-6}$
7	$7.974410 \cdot 10^{-3}$	17	$2.468354 \cdot 10^{-6}$
8	$3.546721 \cdot 10^{-3}$	18	$1.100394 \cdot 10^{-6}$
9	$1.582772 \cdot 10^{-3}$	19	$4.905566 \cdot 10^{-7}$
10	$7.052747 \cdot 10^{-4}$		

Табела 8.8 Сезонски вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност за сезоната зима и нивна споредба со функцијата mle во Matlab

	Коефициент на облик $k_{wei}$	Коефициент на скалирање $c_{wei}$
Метод на Newton	1.3411	8.3705
mle (Matlab)	1.3411	8.3705
отстапување [%]	0	0

За потребите на оптимизацијата на погонот на ЕЕС, којашто се врши во фаза 2 и фаза 3 од предложениот алгоритам, како сезона за генерирање на случајните брзини на ветер е одбрана сезоната лето. Според тоа, ретроспективно во Табелите 8.9 и 8.10 се прикажани часовните вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност, т.е. часовните вредности на коефициентот на облик  $k_{wei}$  и коефициентот на скалирање  $c_{wei}$ , врз основа на кои се добиваат случајната активна и реактивна моќност на ветерната електрана.

Табела 8.9 Часовни вредности на коефициентот на облик  $k_{wei}$ 

$j$	1	2	3	4	5	6
$k_{wei}$	1.4406	1.3436	1.3467	1.4269	1.5630	1.5939
$j$	7	8	9	10	11	12
$k_{wei}$	1.6035	1.6141	1.6948	1.8904	2.0226	2.0692
$j$	13	14	15	16	17	18
$k_{wei}$	2.1341	2.1048	2.0724	2.3195	2.6790	2.5254
$j$	19	20	21	22	23	24
$k_{wei}$	2.3389	2.9905	3.5176	1.8315	1.8186	1.6133

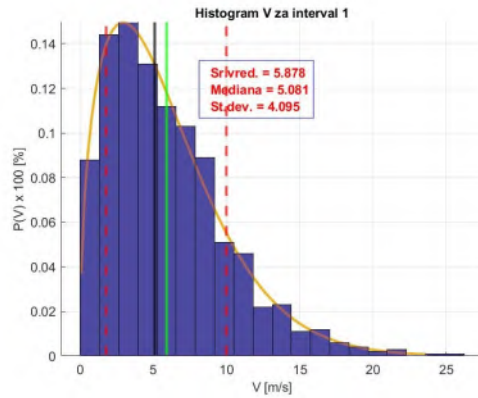
Табела 8.10 Часовни вредности на коефициентот на скалирање  $c_{wei}$ 

$j$	1	2	3	4	5	6
$c_{wei}$	6.3334	6.3004	6.5996	6.8435	7.1950	7.5344
$j$	7	8	9	10	11	12
$c_{wei}$	7.7052	7.4993	7.1247	6.6255	6.4111	6.2908
$j$	13	14	15	16	17	18
$c_{wei}$	6.3210	6.4650	6.5623	6.9090	7.3115	7.5002
$j_{wei}$	19	20	21	22	23	24
$c$	7.3338	8.1002	8.6802	6.9654	6.9765	6.6503

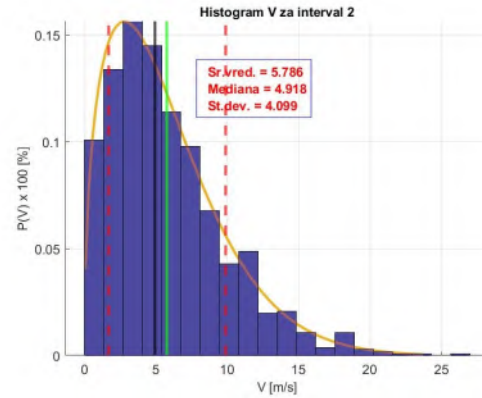
### 8.1.2 Резултати од симулациите со методата Монте Карло и приказ на добиените хистограми со распределба на веројатноста на брзините на ветер за соодветната сезона

За успешно и адекватно моделирање на стохастичноста на ветерната енергија, извршена е симулација на 1.000 случајно генерирани сценарија за брзината на ветер, со методата Монте Карло, за соодветната сезона, а кои се базираат на часовните вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност, кои се прикажани во Табелите 8.9 и 8.10 респективно.

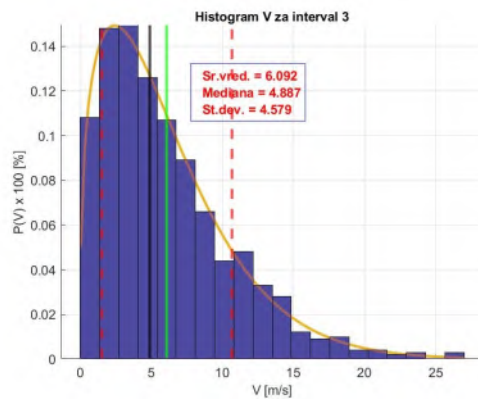
За таа цел, во програмскиот пакет Matlab е моделирана програмата „Monte\_Karlo\_simulacija.m“, чиешто главни влезни параметри се претходно пресметаните часовни вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност. Излезни параметри од програмата се 1.000 случајно генерирани сценарија за брзината на ветер (како и 1.000 случајни вредности за активната и реактивната моќност на ветерната електрана, но тие ќе бидат прикажани во наредните потпоглавја), врз основа на кои таа генерира хистограми со распределба на веројатноста за појава на одредени брзини на ветер, за секој временски интервал во рамките на оптимизациониот период, т.е. 24 часа. На слика 8.2 од (а) до (ќ) респективно се прикажани хистограмите со распределба на веројатноста за појава на брзините на ветер, за секој временски интервал.



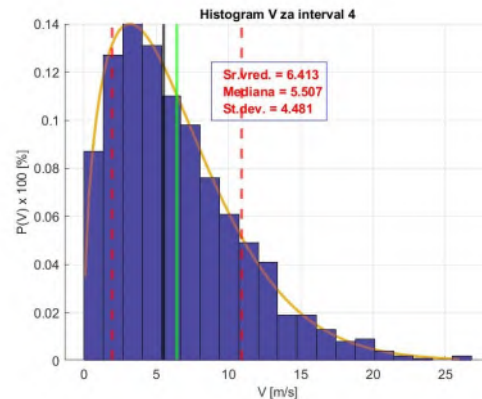
(a)



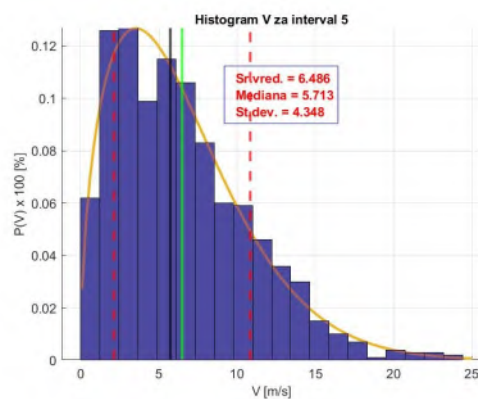
(б)



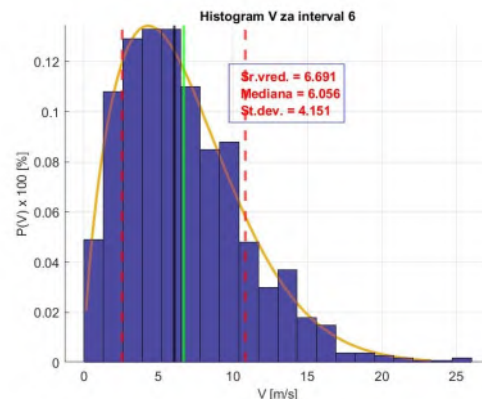
(в)



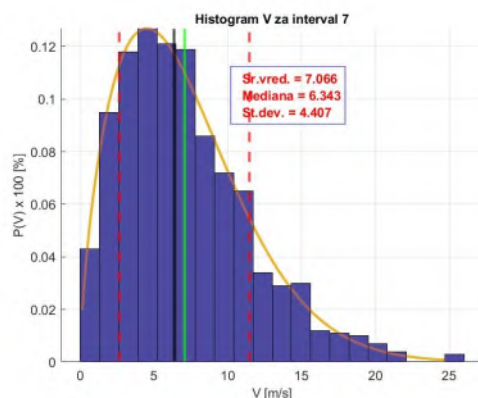
(г)



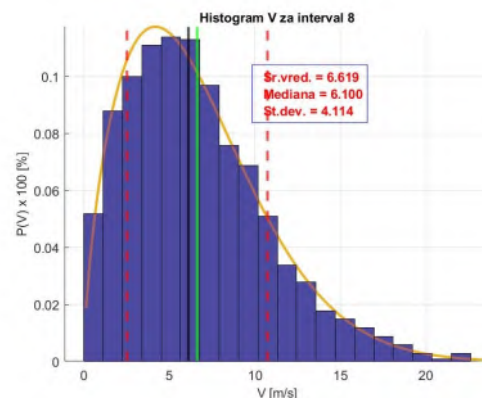
(д)



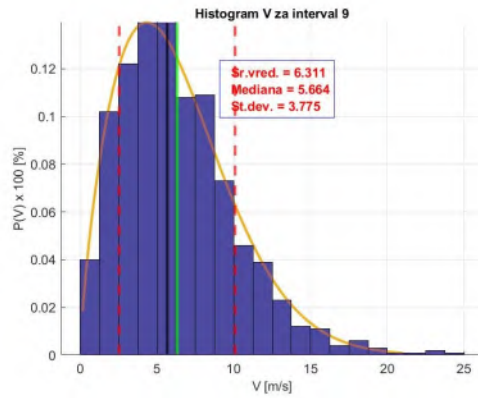
(е)



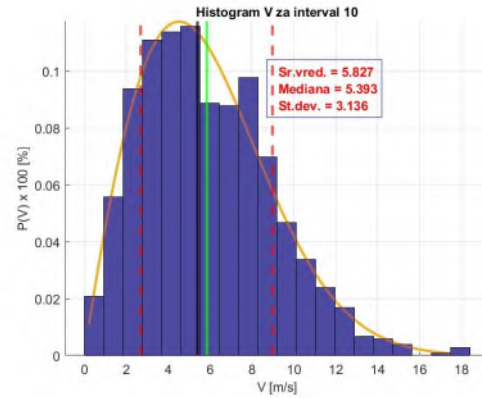
(ж)



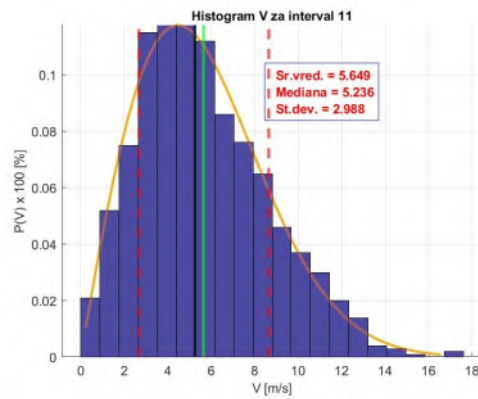
(з)



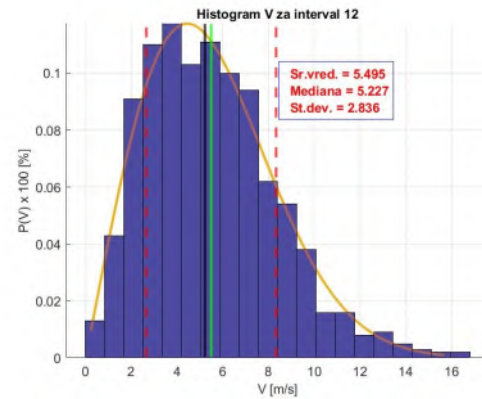
(З)



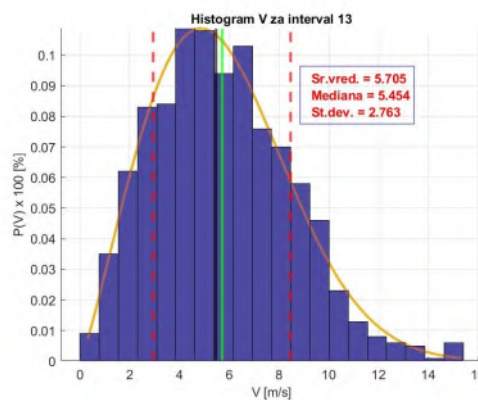
(С)



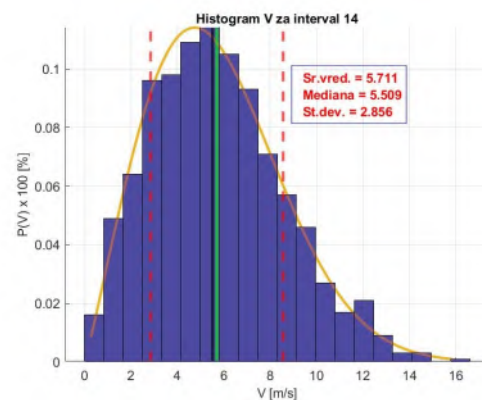
(И)



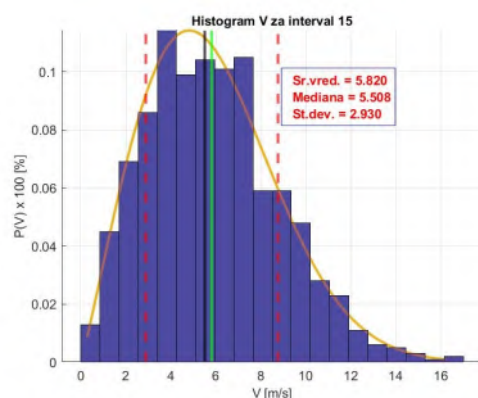
(Ј)



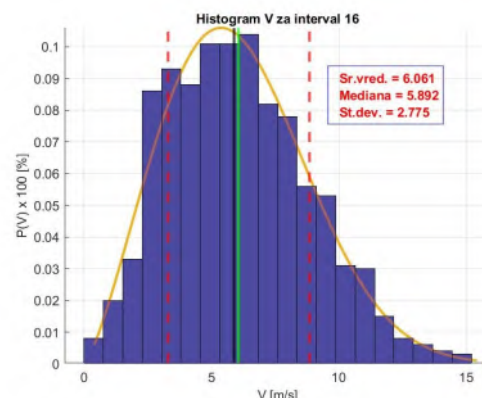
(К)



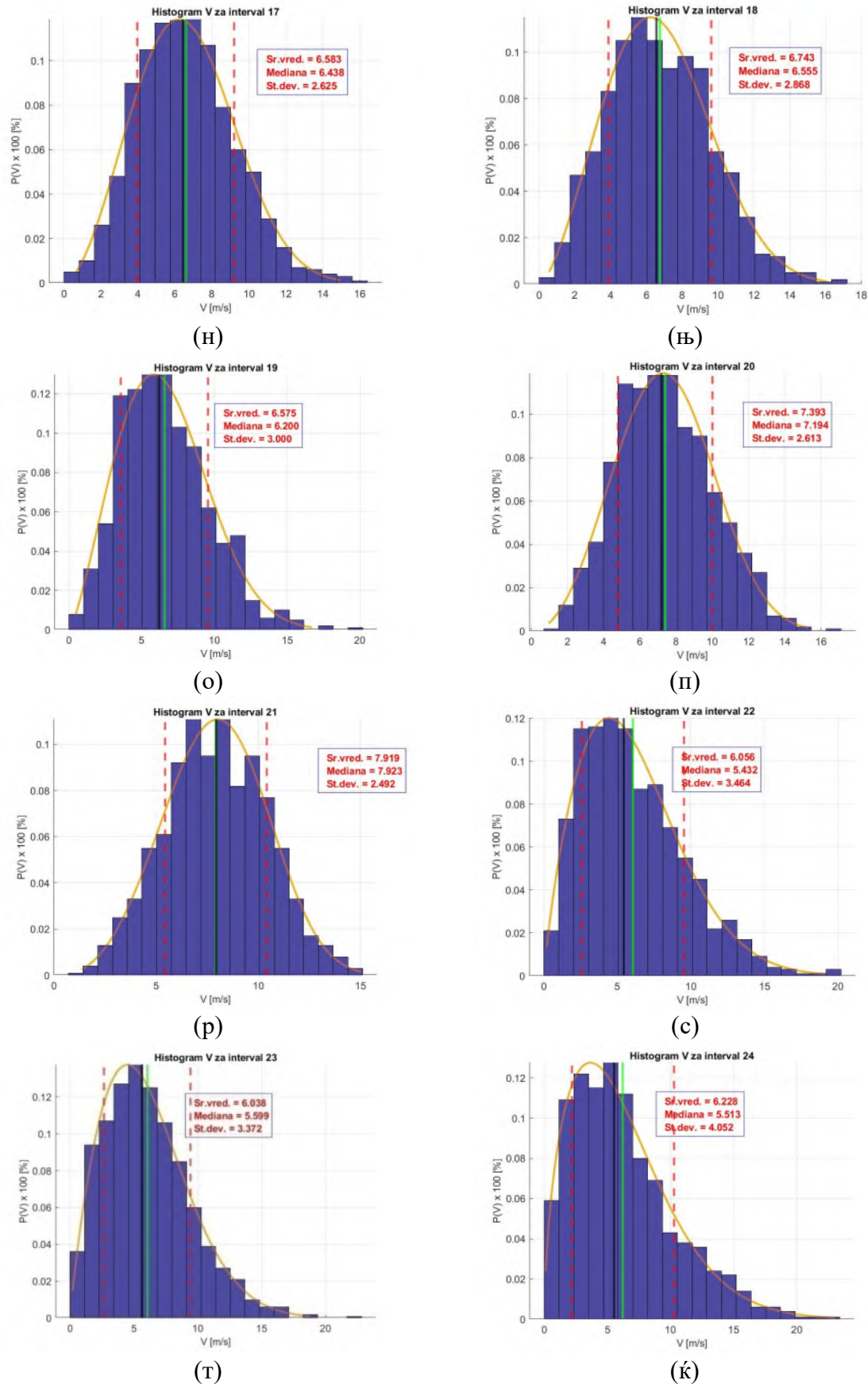
(Л)



(Љ)



(М)



Слика 8.2 Хистограми со распределба на веројатноста за појава на брзините на ветер за интервал 1 – 24



### 8.1.3 Анализа на добиените резултати од моделирањето на стохастичноста на ветерната енергија

Во табелите 8.2, 8.4, 8.6 и 8.8 е даден паралелен приказ на резултатите за сезонските вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност, добиени со предложениот метод и со интегрирана функција  $mle$  во Matlab. Просечното отстапување изнесува 0 %, со што се докажува точноста на предложениот математички модел. Според тоа, може да се констатира дека тој како точен и ефикасен пристап, може да најде практична примена за пресметка на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност, во случаи кога се познати измерените брзини на ветер за конкретната локација, за период од една или две години.

Од Табелите 8.2, 8.4, 8.6 и 8.8 може да се увиди дека параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност се разликуваат за секоја сезона поединечно, со што се потврдува поставената **Помошна хипотеза 3**. Идентична констатација може да се даде и за хистограмите за веројатноста за појава на брзините на ветер, за секој интервал поединечно, којашто се базира на различните часовни вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност. Не е тешко да се воочи дека добиените хистограми се различни за секој час поединечно, имајќи ги предвид различните часовни вредности на параметрите на Weibull-овата функција на густина на распределба на веројатност, врз основа на кој може да се каже дека ветерната енергија може да варира и од час до час. Според тоа, се докажува стохастичноста на ветерната енергија, како и оправданоста, односно неминовноста на предложениот пристап за сезонско групирање на измерените брзини на ветер.

## 8.2 UNIT COMMITMENT (UC)

### 8.2.1 Тест систем 1

Овој тест систем се состои од 6 термоелектрани (од IEEE 30-bus системот), чијшто оптимизационен период од 24 часа е поделен во 24 временски интервали, со резолуција од 1 час. Податоците за термоелектраните, оптоварувањето во системот итн. се преземени од [69, 145, 146], а тие се прикажани во Табелите 8.11 и 8.12.

Предложениот бинарно-кодирани NSAGA е применет на персонален компјутер со: Windows 10 system, Intel Core i7-9750H CPU@2.60GHz, 16 GB RAM, како и MATLAB R2020a. Евалуацијата на тест системот 1 е прикажана во Табелата 8.13.

Табела 8.11 Податоци за термоелектраните за тест систем 1

	$a_t$ (€/h)	$b_t$ (€/MW)	$c_t$ (€/MW <sup>2</sup> )	$P_{GT,t}^{\min}$ (MW)	$P_{GT,t}^{\max}$ (MW)
$P_{GT,1}$	0	2	0.00375	50	200
$P_{GT,2}$	0	1.7	0.0175	20	80
$P_{GT,3}$	0	1	0.0625	15	50
$P_{GT,4}$	0	3.25	0.00834	10	35
$P_{GT,5}$	0	3	0.025	10	30
$P_{GT,6}$	0	3	0.025	12	40
	$MUT_t$ (h)	$MDT_t$ (h)	$HSC_t$ (€)	$CSC_t$ (€)	$CSH_t$ (h)

$P_{GT,1}$	1	1	70	176	2
$P_{GT,2}$	2	2	74	187	1
$P_{GT,3}$	1	1	50	113	1
$P_{GT,4}$	1	2	110	267	1
$P_{GT,5}$	2	1	72	180	1
$P_{GT,6}$	1	1	40	113	1

Табела 8.12 Податоци за оптоварувањето во системот за тест систем 1

$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_{P,j}$ (MW)	166	196	229	267	283.4	272	246	213	192	161	147	160
$j$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$P_{P,j}$ (MW)	170	185	208	232	246	241	236	225	204	182	161	131

Табела 8.13 Евалуација на тест систем 1

Термоелектрани	Хидроелектрани	$R$ (MW)	$N_{pop}$	$mgen$	Бр. на независни симулации
6	0	$0.1 \cdot P_{P,max}$	100	200	30

Квалитетот на добиеното решение ќе биде спореден со решението од два други хибридни метахевристички методи, т.е. DA-PSO[145] и PSO-GWO[146], како и со претходно предложениот AGA [69]. Од друга страна, за подобра компаративна анализа, добиеното решение ќе биде споредено и со решението од класичен GA, што исто така ќе биде применет на тест системот 1. Треба да се напомене дека во класичниот GA, не се вклучени новопредложените оператори, како и новопредложените техники за справување со ограничувањата. Во табелите 8.14 и 8.15 респективно е прикажана оптималната бинарна комбинација на ангажираните електрани, односно оптималното решение на тест системот 1. Во табелата 8.16 е прикажана споредбата на добиеното решение т.е. вкупните трошоци за работа, со резултатите од останатите метахевристички алгоритми.

Табела 8.14 Оптимална бинарна комбинација на тест систем 1

$j$	$P_{GT,1}$	$P_{GT,2}$	$P_{GT,3}$	$P_{GT,4}$	$P_{GT,5}$	$P_{GT,6}$
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1
8	1	1	0	1	1	1
9	1	1	1	1	1	0
10	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	0
17	1	1	1	1	1	1

18	1	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	0
23	1	1	1	1	1	1
24	1	0	1	0	1	0

Табела 8.15 Оптимално решение на тест систем 1

$j$	$P_{GT,1}$ (MW)	$P_{GT,2}$ (MW)	$P_{GT,3}$ (MW)	$P_{GT,4}$ (MW)	$P_{GT,5}$ (MW)	$P_{GT,6}$ (MW)
1	91.51	27.49	15.00	10.00	10.00	12.00
2	115.15	33.37	15.11	10.11	10.15	12.11
3	140.89	39.28	16.42	10.13	10.11	12.17
4	170.57	45.47	18.33	10.24	10.23	12.16
5	183.04	48.22	19.22	10.24	10.37	12.32
6	175.49	45.52	18.67	10.03	10.11	12.18
7	153.01	42.23	17.55	10.40	10.40	12.40
8	142.12	38.74	0.00	10.00	10.07	12.07
9	121.46	34.88	15.50	10.12	10.04	0.00
10	87.01	26.99	15.00	10.00	10.00	12.00
11	75.00	24.59	15.24	10.05	10.07	12.05
12	85.80	27.20	15.00	10.00	10.00	12.00
13	94.77	28.23	15.00	10.00	10.00	12.00
14	105.75	31.84	15.14	10.12	10.04	12.12
15	124.46	35.53	15.72	10.06	10.06	12.19
16	152.17	42.01	17.47	10.17	10.17	0.00
17	153.30	42.38	17.68	10.20	10.20	12.23
18	151.85	40.46	16.69	10.00	10.00	12.00
19	147.23	40.40	16.37	10.00	10.00	12.00
20	138.21	38.57	16.15	10.05	10.01	12.01
21	121.35	34.79	15.34	10.19	10.24	12.10
22	113.48	33.38	15.12	10.00	10.02	0.00
23	86.72	27.28	15.00	10.00	10.00	12.00
24	106.00	0.00	15.00	0.00	10.00	0.00

Табела 8.16 Споредба на добиените резултати за тест систем 1

	DA-PSO [145]	PSO-GWO [146]	GA [69]	AGA [69]	NSAGA	Подобр- ување (%)
$FT_{best}$ (€)	13292.28	13600.00	13223.99	<b>13152.27</b>	<b>12827.48</b>	<b>2.53</b>
$FT_{mean}$ (€)	-	-	13285.00	<b>13177.78</b>	<b>12845.57</b>	<b>2.59</b>
$FT_{worst}$ (€)	-	-	13346.01	<b>13201.51</b>	<b>12863.65</b>	<b>2.63</b>

## 8.4 SHORT-TERM HYDRO-THERMAL SCHEDULING (SHTS) CO DC МОДЕЛ

### 8.4.1 Тест систем 2

Тест системот 2 се состои од 2 термоелектрани и 2 хидроелектрани, со оптимизационен период од 24 часа, кој е поделен во 3 временски интервали, со резолуција од 8 часа. Податоците за термоелектраните, хидроелектраните, оптоварувањето во системот итн. се преземени од [70, 147], а теи респективно се прикажани во табелите 8.17, 8.18 и 8.19.

Предложениот реално-кодиран NSAGA е применет на персонален компјутер со конфигурација: Windows 10 system, Intel Core i7-9750H CPU@2.60GHZ, 16 GB RAM, како и MATLAB R2020a. Евалуацијата на тест системот 2 е прикажана во табелата 8.20.

Табела 8.17 Податоци за термоелектраните за тест систем 2

	$a_t$ (€/h)	$b_t$ (€/MW)	$c_t$ (€/MW <sup>2</sup> )	$d_t$ (€/h)	$e_t$ (1/MW)	$P_{GT,t}^{\min}$ (MW)	$P_{GT,t}^{\max}$ (MW)
$P_{GT,1}$	0	2	0.00375	12	0.0550	50	200
$P_{GT,2}$	0	1.7	0.0175	14	0.0450	20	80

Табела 8.18 Податоци за хидроелектраните за тест систем 2

	$\alpha_h$ (mcf/h)	$\beta_h$ (mcf/MW)	$\gamma_h$ (mcf/MW <sup>2</sup> )	$V_{k,h}$ (mcf)	$P_{GH,h}^{\min}$ (MW)	$P_{GH,h}^{\max}$ (MW)
$P_{GH,1}$	1.980	0.306	0.000216	2500	0	400
$P_{GH,2}$	0.936	0.612	0.000360	2100	0	300

Табела 8.19 Податоци за оптоварувањето во системот за тест систем 2

$j$	1	2	3
$P_{P,j}$ (MW)	900	1200	1100

Табела 8.20 Евалуација на тест систем 2

Термоелектрани	Хидроелектрани	$R$ (MW)	$N_{pop}$	$mgen$	Бр. на независни симулации
2	2	$0.1 \cdot P_{P,max}$	50	100	30

Решението на тест системот 2 ќе биде споредено со решението од три други метахевристички методи, т.е. AIS, DE и EP [147], како и со претходно предложениот SAGA [70]. Во Табелите 8.21 и 8.22 респективно се прикажани решението на тест системот 2 со предложениот реално-кодиран NSAGA, како и споредбата на добиеното решение т.е. вкупните трошоци за работа, со резултатите од останатите метахевристички алгоритми.

Табела 8.21 Оптимално решение на тест систем 2

$j$	$P_{GT,1}$ (MW)	$P_{GT,2}$ (MW)	$P_{GH,1}$ (MW)	$P_{GH,2}$ (MW)	$P_L$ (MW)	$Q_{t,1}$ (mcf/h)	$Q_{t,2}$ (mcf/h)
1	181.69	263.03	400.00	86.24	30.96	158.94	56.39
2	300.00	261.48	400.00	300.00	61.48	158.94	216.94
3	128.02	321.87	400.00	300.00	49.89	158.94	216.94

Табела 8.22 Споредба на добиените резултати за тест систем 2

	EP [147]	DE [147]	AIS [147]	SAGA [70]	NSAGA	Подобрување (%)
$FT_{best}$ (€)	66198.00	66121.00	66117.00	<b>57640.00</b>	<b>44601.35</b>	<b>29.23</b>
$FT_{mean}$ (€)	-	-	-	-	<b>44612.69</b>	-
$FT_{worst}$ (€)	-	-	-	-	<b>44631.25</b>	-
$CPU_{time}$ (s)	75.48	60.76	53.43	<b>5.40</b>	<b>4.89</b>	<b>10.43</b>

### 8.4.2 Тест систем 3

Тест системот 3 е составен од 4 термоелектрани и 2 хидроелектрани, со оптимизационен период од 48 часа, кој е поделен во 4 временски интервали, со резолуција од 12 часа. Податоците за термоелектраните, хидроелектраните, оптоварувањето во системот итн. се преземени од [70, 147], а тие респективно се прикажани во табелите 8.23, 8.24 и 8.25.

Предложениот реално-кодиран NSAGA е применет на персонален компјутер со конфигурација: Windows 10 system, Intel Core i7-9750H CPU@2.60GHZ, 16 GB RAM, како и MATLAB R2020a. Евалуацијата на тест системот 3 е прикажана во табелата 8.26.

Табела 8.23 Податоци за термоелектраните за тест систем 3

	$a_t$ (€/h)	$b_t$ (€/MW)	$c_t$ (€/MW <sup>2</sup> )	$d_t$ (€/h)	$e_t$ (1/MW)	$P_{GT,t}^{\min}$ (MW)	$P_{GT,t}^{\max}$ (MW)
$P_{GT,1}$	10	3.25	0.0083	12	0.0450	20	125
$P_{GT,2}$	10	2.00	0.0037	18	0.0370	30	175
$P_{GT,3}$	20	1.75	0.0175	16	0.0380	40	250
$P_{GT,4}$	20	1.00	0.0625	14	0.0400	50	300

Табела 8.24 Податоци за хидроелектраните за тест систем 3

	$\alpha_h$ (ac-f/h)	$\beta_h$ (ac-f/MW)	$\gamma_h$ (ac-f/MW <sup>2</sup> )	$V_{k,h}$ (ac-f)	$P_{GH,h}^{\min}$ (MW)	$P_{GH,h}^{\max}$ (MW)
$P_{GH,1}$	260	8.5	0.00986	125000	0	250
$P_{GH,2}$	250	9.8	0.01140	286000	0	500

Табела 8.25 Податоци за оптоварувањето во системот за тест систем 3

$j$	1	2	3	4
$P_{P,j}$ (MW)	900	1100	1000	1300

Табела 8.26 Евалуација на тест систем 3

Термоелектрани	Хидроелектрани	$R$ (MW)	$N_{pop}$	$mgen$	Бр. на независни симулации
4	2	$0.1 \cdot P_{P,max}$	50	200	30

Решението на тест системот 3 ќе биде споредено со решението од четири други метахевристички методи, односно AIS, DE, PSO и EP[147]. Во табелите 8.27 и 8.28 респективно се прикажани решението на тест системот 3 со предложениот реално-кодиран NSAGA, како и споредбата на вкупните трошоци за работа со резултатите од останатите метахевристички алгоритми.

Табела 8.27 Оптимално решение на тест систем 3

$j$	$P_{GT,1}$ (MW)	$P_{GT,2}$ (MW)	$P_{GT,3}$ (MW)	$P_{GT,4}$ (MW)	$P_{GH,1}$ (MW)	$P_{GH,2}$ (MW)	$P_L$ (MW)	$Q_{t,1}$ (ac-f/h)	$Q_{t,2}$ (ac-f/h)
1	79.13	132.94	91.01	50.00	250.00	313.24	16.31	3001.25	4438.31
2	113.19	166.76	116.17	50.00	250.00	428.81	24.93	3001.25	6548.57
3	85.88	165.46	116.63	51.03	250.00	351.21	20.21	3001.25	5097.96
4	124.90	172.13	207.56	79.67	250.00	500.00	34.26	3001.25	8000.00

Табела 8.28 Споредба на добиените резултати за тест систем 3

	EP [147]	PSO [147]	DE [147]	AIS [147]	NSAGA	Подобрување (%)
$FT_{best}$ (€)	94250	94126	94094	<b>93950</b>	<b>85039</b>	<b>10.48</b>
$FT_{mean}$ (€)	-	-	-	-	<b>85084</b>	-
$FT_{worst}$ (€)	-	-	-	-	<b>85121</b>	-
$CPU_{time}$ (s)	67.82	80.37	83.54	<b>59.14</b>	<b>37.95</b>	<b>55.84</b>

## 8.5 SHORT-TERM HYDRO-THERMAL SCHEDULING (SHTS) CO AC МОДЕЛ

### 8.5.1 Тест систем 4

Овој систем е всушност benchmark верзија на IEEE 30 bus system што се состои од 30 јазли, 6 генератори (од кои генераторите во јазлите 11 и 13 ги прикажуваат хидроелектраните), 2 компензатори (во јазлите 10 и 24) и 41 вод. Оптимизациониот период изнесува 24 часа, кој е поделен во 2 временски интервали со резолуција од 12 часа. Оптоварувањето во првиот интервал е всушност фиксната вредност на IEEE 30 bus system т.е. 283,4 MW, додека оптоварувањето во вториот интервал изнесува 85% од она во првиот интервал т.е. 240,89 MW. Минималниот и максималниот напон на генераторите изнесува 0,95 p.u. и 1,1 p.u. респективно, додека на PQ јазлите изнесуваат 0,95 p.u. и 1,05 p.u. респективно. Она што треба да се каже е тоа дека споредбено со иницијализацијата преку UC, којашто е применета во предложениот алгоритам за главниот IEEE 30 bus system, иницијализацијата за тест системот е извршена на нешто подруг начин. Почетните вредности за термоелектраните се добиени според методот на Лагранж, додека почетните вредности за хидроелектраните според средниот расположлив проток, а потоа, е применет изразот (7.86). Ваквата модификација се базира на тоа дека во предложениот алгоритам, во референтите [63, 148], не е интегрирана фазата UC.

Податоците за термоелектраните, хидроелектраните, компензаторите, јазлите, преносната мрежа и оптоварувањето во системот итн. се преземени од [63, 84, 148-150], а тие ретроспективно се прикажани во табелите 8.29, 8.30, 8.31, 8.32, 8.33 и 8.34.

Предложениот реално-кодирани NSAGA е применет на персонален компјутер со конфигурација: Windows 10 system, Intel Core i7-9750H CPU@2.60GHZ, 16 GB RAM, како и MATLAB R2020a. Евалуацијата на тест системот 4 е прикажана во табелата 8.35.

Табела 8.29 Податоци за термоелектраните за тест систем 4

	јазол	$a_t$ (€/h)	$b_t$ (€/MW)	$c_t$ (€/MW <sup>2</sup> )	$P_{GT,t}^{\min}$ (MW)	$P_{GT,t}^{\max}$ (MW)	$Q_{GT,t}^{\min}$ (MVA <sub>r</sub> )	$Q_{GT,t}^{\max}$ (MVA <sub>r</sub> )
$P_{GT,1}$	1	0	2.00	0.00375	50	200	-20	200
$P_{GT,2}$	2	0	1.75	0.01750	20	80	-20	100
$P_{GT,3}$	5	0	1.00	0.06250	15	50	-15	80
$P_{GT,4}$	8	0	3.25	0.00834	10	35	-15	60

Табела 8.30 Податоци за хидроелектраните за тест систем 4

	јазол	$\alpha_h$ (mcf/h)	$\beta_h$ (mcf/MW)	$\gamma_h$ (mcf/MW <sup>2</sup> )	$V_{k,h}$ (mcf)	$P_{GH,h}^{\min}$ (MW)	$P_{GH,h}^{\max}$ (MW)	$Q_{GH,h}^{\min}$ (MVar)	$Q_{GH,h}^{\max}$ (MVar)
$P_{GH,1}$	11	1.980	0.306	0.000216	200	10	30	-10	50
$P_{GH,2}$	13	0.936	0.612	0.000360	400	12	40	-15	60

Табела 8.31 Податоци за компензаторите за тест систем 4

	јазол	$Q_{S,s}^{\min}$ (MVar)	$Q_{S,s}^{\max}$ (MVar)
$Q_{S,1}$	10	0	19
$Q_{S,2}$	24	0	4.3

Табела 8.32 Податоци за јазлите за тест систем 4

јазол	тип	$U_b$ (kV)	$P_{Lm}$ (MW)	$Q_{Lm}$ (MW)	$Q_{Sm}$ (MW)	област	$U_{\min}$ (pu)	$U_{\max}$ (pu)
1	3	135	0	0	0	1	0.90	1.10
2	2	135	21.7	12.7	0	1	0.90	1.10
3	1	135	2.4	1.2	0	1	0.90	1.10
4	1	135	7.6	1.6	0	1	0.90	1.10
5	2	135	94.2	19.0	0	1	0.90	1.10
6	1	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
7	1	135	22.8	10.9	0	1	0.90	1.10
8	2	135	30.0	30.0	0	1	0.90	1.10
9	1	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
10	1	135	5.8	2.0	0	1	0.90	1.10
11	2	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
12	1	135	11.2	7.5	0	1	0.90	1.10
13	2	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
14	1	135	6.2	1.6	0	1	0.90	1.10
15	1	135	8.2	2.5	0	1	0.90	1.10
16	1	135	3.5	1.8	0	1	0.90	1.10
17	1	135	9.0	5.8	0	1	0.90	1.10
18	1	135	3.2	0.9	0	1	0.90	1.10
19	1	135	9.5	3.4	0	1	0.90	1.10
20	1	135	2.2	0.7	0	1	0.90	1.10
21	1	135	17.5	11.2	0	1	0.90	1.10
22	1	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
23	1	135	3.2	1.6	0	1	0.90	1.10
24	1	135	8.7	6.7	0	1	0.90	1.10
25	1	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
26	1	135	3.5	2.3	0	1	0.90	1.10
27	1	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
28	1	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
29	1	135	2.4	0.9	0	1	0.90	1.10
30	1	135	10.6	1.9	0	1	0.90	1.10

Табела 8.33 Податоци за преносната мрежа за тест систем 4

број на вод	почетен јазол	краен јазол	$R$ (pu)	$X$ (pu)	$B$ (pu)	$S_{GRg}^{\max}$ (MVA)	статус
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0528	130	1
2	1	3	0.0452	0.1852	0.0408	130	1
3	2	4	0.0570	0.1737	0.0368	65	1
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0084	130	1
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0418	130	1
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0374	65	1
7	4	6	0.0119	0.0414	0.0090	90	1
8	5	7	0.0460	0.1160	0.0204	130	1
9	6	7	0.0267	0.0820	0.0170	130	1
10	6	8	0.0120	0.0420	0.0090	32	1
11	6	9	0.0000	0.2080	0.0000	65	1
12	6	10	0.0000	0.2230	0.0000	32	1
13	9	11	0.0000	0.2080	0.0000	65	1
14	9	10	0.0000	0.1100	0.0000	65	1
15	4	12	0.0000	0.2560	0.0000	65	1
16	12	13	0.0000	0.1400	0.0000	65	1
17	12	14	0.1231	0.2559	0.0000	32	1
18	12	15	0.0662	0.1304	0.0000	32	1
19	12	16	0.0945	0.1987	0.0000	32	1
20	14	15	0.2210	0.1997	0.0000	16	1
21	16	17	0.0824	0.1932	0.0000	16	1
22	15	18	0.1070	0.2185	0.0000	16	1
23	18	19	0.0639	0.1292	0.0000	16	1
24	19	20	0.0340	0.0680	0.0000	32	1
25	10	20	0.0936	0.2090	0.0000	32	1
26	10	17	0.0324	0.0845	0.0000	32	1
27	10	21	0.0348	0.0749	0.0000	32	1
28	10	22	0.0727	0.1499	0.0000	32	1
29	21	22	0.0116	0.0236	0.0000	32	1
30	15	23	0.1000	0.2020	0.0000	16	1
31	22	24	0.1150	0.1790	0.0000	16	1
32	23	24	0.1320	0.2700	0.0000	16	1
33	24	25	0.1885	0.3292	0.0000	16	1
34	25	26	0.2544	0.3800	0.0000	16	1
35	25	27	0.1093	0.2087	0.0000	16	1
36	28	27	0.0000	0.3690	0.0000	65	1
37	27	29	0.2198	0.4153	0.0000	16	1
38	27	30	0.3202	0.6027	0.0000	16	1
39	29	30	0.2399	0.4533	0.0000	16	1
40	8	28	0.0636	0.2000	0.0428	32	1
41	6	28	0.0169	0.0599	0.0130	32	1



Табела 8.34 Податоци за оптоварувањето во системот за тест систем 4

$j$	1	2
$P_{P,j}$ (MW)	283.4	240.89

Табела 8.35 Евалуација на тест систем 4

Термоелектрани	Хидроелектрани	$R$ (MW)	$N_{pop}$	$mgen$	Бр. на независни симулации
4	2	$0.1 \cdot P_{P,max}$	50	300	30

Решението на тест системот 4 ќе биде споредено со решението од четири други метахевристички методи, односно CCSA, MCSA, ENCSA [63] и SAGA[72]. Во табелите 8.36 и 8.37 ретроспективно се прикажани решението на тест системот 4 со NSAGA, како и споредбата на добиеното решение за вкупните трошоци за работа, со резултатите од останатите метахевристички алгоритми.

Табела 8.36 Оптимално решение на тест систем 4

$j$	$P_{GT,1}$ (MW)	$P_{GT,2}$ (MW)	$P_{GT,3}$ (MW)	$P_{GT,4}$ (MW)	$P_{GH,1}$ (MW)	$P_{GH,2}$ (MW)	$S_L$ (MVA)	$Q_{S,1}$ (MVAr)	$Q_{S,2}$ (MVAr)
1	156.05	39.64	17.01	10.00	30.00	40.00	38.38	7.26	3.75
2	134.07	31.64	15.00	10.01	30.00	26.77	27.37	0.73	2.07

$j$	$U_{G,1}$ (p.u.)	$U_{G,2}$ (p.u.)	$U_{G,3}$ (p.u.)	$U_{G,4}$ (p.u.)	$U_{G,5}$ (p.u.)	$U_{G,6}$ (p.u.)
1	1.0073	0.9973	0.9673	0.9673	1.0073	1.0073
2	1.0073	1.0073	0.9973	0.9873	1.0073	1.0073

Табела 8.37 Споредба на добиените резултати за тест систем 4

	CCSA [63]	MCSA [63]	ENCSA [63]	SAGA [72]	NSAGA	Подобрување (%)
$FT_{best}$ (€)	13722.208	13718.230	13655.538	<b>12491.603</b>	<b>12475.155</b>	<b>0.132</b>
$FT_{mean}$ (€)	13759.815	13783.937	13808.732	<b>12588.712</b>	<b>12544.178</b>	<b>0.355</b>
$FT_{worst}$ (€)	13815.143	14066.094	14548.909	<b>12673.007</b>	<b>12598.461</b>	<b>0.592</b>
Ст.дев.(€)	16.895	53.707	171.314	<b>50.523</b>	<b>28.067</b>	<b>80.009</b>
$CPU_{time}$ (s)	67.036	65.695	65.871	<b>53.221</b>	<b>39.231</b>	<b>35.661</b>
Успешност (%)	76	91	98	<b>98</b>	<b>99</b>	<b>1.020</b>

## 8.6 ПРИМЕНА НА NSAGA ЗА РЕШАВАЊЕ НА SHORT-TERM HYDROTHERMAL SCHEDULING (SHTS) НА IEEE 30 BUS SYSTEM

Целта на ова потпоглавје, коешто припаѓа на истражувачкиот дел од оваа докторска дисертација, е приказ на компаративна анализа помеѓу DC и AC моделот на новопредложениот NSAGA. Со други зборови, DC и AC моделот ќе бидат применети за решавање на ист оптимизационен проблем, т.е. потпроблемот SHTS, со цел увид во предностите и недостатоците на двата модела, пред да се премине кон решавањето на главниот проблем т.е. случајот за анализа Short-Term Hydro-Thermal-Wind Scheduling (SHTWS).

### 8.6.1 DC модел

DC моделот на IEEE 30 bus system се состои од 30 јазли, 6 генератори и 41 вод. Оптимизациониот период изнесува 24 часа, кој е поделен во 24 временски интервали со резолуција од 1 час.

Податоците за термоелектраните, хидроелектраните, природниот доток на вода во акумулациите, јазлите, преносната мрежа и оптоварувањето во системот итн. се преземени од [63, 69, 84, 148-150], а тие респективно се прикажани во табелите 8.38, 8.39, 8.40, 8.41, 8.42 и 8.43.

Предложениот реално-кодирани NSAGA е применет на персонален компјутер со конфигурација: Windows 10 system, Intel Core i7-9750H CPU@2.60GHZ, 16 GB RAM, како и MATLAB R2020a. Евалуацијата на DC моделот на IEEE 30 bus system е прикажана во табелата 8.44.

Табела 8.38 Податоци за термоелектраните за IEEE 30 bus system- DC модел

	јазол	$a_t$ (€/h)	$b_t$ (€/MW)	$c_t$ (€/MW <sup>2</sup> )	$d_t$ (€/h)	$e_t$ (1/MW)	$P_{GT,t}^{\min}$ (MW)	$P_{GT,t}^{\max}$ (MW)	$URT_t$ (MW)	$DRT_t$ (MW)
$P_{GT,1}$	1	0	2.00	0.00375	18	0.037	50	200	65	85
$P_{GT,2}$	2	0	1.75	0.01750	16	0.038	20	80	12	22
$P_{GT,3}$	5	0	1.00	0.06250	14	0.040	15	50	12	15
$P_{GT,4}$	8	0	3.25	0.00834	12	0.045	10	35	8	16

Табела 8.39 Податоци за хидроелектраните за IEEE 30 bus system- DC модел (од mcf во m<sup>3</sup>)

	јазол	$\alpha_h$ (m <sup>3</sup> /h)	$\beta_h$ (m <sup>3</sup> /MW)	$\gamma_h$ (m <sup>3</sup> /MW <sup>2</sup> )	$V_{k,h}$ (m <sup>3</sup> )	$P_{GH,h}^{\min}$ (MW)	$P_{GH,h}^{\max}$ (MW)	$URH_h$ (MW)	$DRH_h$ (MW)
$P_{GH,1}$	11	56.067	8.665	0.0061	5663.37	10	30	8	16
$P_{GH,2}$	13	26.505	17.33	0.0100	11326.74	12	40	8	16

Табела 8.40 Податоци за природниот доток на вода во акумулациите за IEEE 30 bus system

$P_{GH,1}$	$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	$Q_{d,h,j}$ (m <sup>3</sup> /h)	100	90	80	70	60	70	80	90	100	110	120	100
	$j$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	$Q_{d,h,j}$ (m <sup>3</sup> /h)	110	120	110	100	90	80	70	60	70	80	90	100
$P_{GH,2}$	$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	$Q_{d,h,j}$ (m <sup>3</sup> /h)	80	80	90	90	80	70	60	70	80	90	90	80
	$j$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	$Q_{d,h,j}$ (m <sup>3</sup> /h)	80	90	90	80	70	60	70	80	90	90	80	80

Табела 8.41 Податоци за јазлите за IEEE 30 bus system- DC модел

јазол	тип	$U_b$ (kV)	$P_{Lm}$ (MW)	област
1	3	135	0	1
2	2	135	21.7	1

3	1	135	2.4	1
4	1	135	7.6	1
5	2	135	94.2	1
6	1	135	0	1
7	1	135	22.8	1
8	2	135	30.0	1
9	1	135	0	1
10	1	135	5.8	1
11	2	135	0	1
12	1	135	11.2	1
13	2	135	0	1
14	1	135	6.2	1
15	1	135	8.2	1
16	1	135	3.5	1
17	1	135	9.0	1
18	1	135	3.2	1
19	1	135	9.5	1
20	1	135	2.2	1
21	1	135	17.5	1
22	1	135	0	1
23	1	135	3.2	1
24	1	135	8.7	1
25	1	135	0	1
26	1	135	3.5	1
27	1	135	0	1
28	1	135	0	1
29	1	135	2.4	1
30	1	135	10.6	1

Табела 8.42 Податоци за преносната мрежа за IEEE 30 bus system- DC модел

број на вод	почетен јазол	краен јазол	$X$ (pu)	$P_{GRg}^{\max}$ (MW)	статус
1	1	2	0.0575	130	1
2	1	3	0.1852	130	1
3	2	4	0.1737	65	1
4	3	4	0.0379	130	1
5	2	5	0.1983	130	1
6	2	6	0.1763	65	1
7	4	6	0.0414	90	1
8	5	7	0.1160	130	1
9	6	7	0.0820	130	1
10	6	8	0.0420	32	1
11	6	9	0.2080	65	1
12	6	10	0.2230	32	1
13	9	11	0.2080	65	1

14	9	10	0.1100	65	1
15	4	12	0.2560	65	1
16	12	13	0.1400	65	1
17	12	14	0.2559	32	1
18	12	15	0.1304	32	1
19	12	16	0.1987	32	1
20	14	15	0.1997	16	1
21	16	17	0.1932	16	1
22	15	18	0.2185	16	1
23	18	19	0.1292	16	1
24	19	20	0.0680	32	1
25	10	20	0.2090	32	1
26	10	17	0.0845	32	1
27	10	21	0.0749	32	1
28	10	22	0.1499	32	1
29	21	22	0.0236	32	1
30	15	23	0.2020	16	1
31	22	24	0.1790	16	1
32	23	24	0.2700	16	1
33	24	25	0.3292	16	1
34	25	26	0.3800	16	1
35	25	27	0.2087	16	1
36	28	27	0.3690	65	1
37	27	29	0.4153	16	1
38	27	30	0.6027	16	1
39	29	30	0.4533	16	1
40	8	28	0.2000	32	1
41	6	28	0.0599	32	1

Табела 8.43 Податоци за оптоварувањето во системот за IEEE 30 bus system- DC модел

$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_{P,j}$ (MW)	166	196	229	267	283.4	272	246	213	192	161	147	160
$j$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$P_{P,j}$ (MW)	170	185	208	232	246	241	236	225	204	182	161	131

Табела 8.44 Евалуација на IEEE 30 bus system - DC модел

Термоелектрани	Хидроелектрани	$R$ (MW)	$N_{pop}$	$mgen$	Бр. на независни симулации
4	2	$0.1 \cdot P_{P,max}$	100	300	50

Во табелата 8.45 е прикажано решението на DC моделот на оптимизациониот потпроблем SHTS, на IEEE 30 bus system со примена на NSAGA.

Табела 8.45 Оптимално решение на IEEE 30 bus system - DC модел

$j$	$P_{GT,1}$ (MW)	$P_{GT,2}$ (MW)	$P_{GT,3}$ (MW)	$P_{GT,4}$ (MW)	$P_{GH,1}$ (MW)	$P_{GH,2}$ (MW)	$P_L$ (MW)	$Q_{t,1}$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_{t,2}$ (m <sup>3</sup> /h)
1	85.03	21.73	15.00	10.00	10.00	26.72	2.48	143.33	496.74
2	99.22	27.53	15.01	10.01	16.42	31.27	3.46	199.97	578.26
3	119.56	31.94	15.01	10.01	22.12	35.27	4.91	250.70	650.25
4	146.70	38.22	16.37	10.23	25.43	37.16	7.10	280.34	684.25
5	156.12	40.32	17.13	10.01	28.03	39.82	8.04	303.77	732.52
6	153.13	37.64	15.45	10.01	26.43	36.90	7.56	289.39	679.62
7	128.94	34.15	15.69	10.01	25.45	37.46	5.69	280.51	689.72
8	107.53	29.45	15.01	10.01	22.63	32.41	4.04	255.27	598.65
9	91.39	28.02	15.01	10.01	21.87	28.77	3.07	248.46	533.42
10	89.50	26.07	15.54	10.12	22.29	0.00	2.51	252.20	0.00
11	54.47	22.07	15.01	10.01	23.80	23.03	1.38	265.72	430.94
12	67.44	21.67	15.01	10.01	19.67	28.06	1.87	228.90	520.65
13	75.16	22.36	15.01	10.01	20.99	28.67	2.20	240.60	531.61
14	86.33	25.26	15.01	10.01	22.12	29.04	2.76	250.73	538.15
15	104.94	28.33	15.01	10.01	25.84	27.65	3.77	284.02	513.26
16	127.91	33.98	15.01	10.01	24.31	26.06	5.27	270.28	484.87
17	155.57	38.09	15.01	10.01	21.87	12.54	7.09	248.52	245.40
18	159.25	41.49	17.82	10.28	19.53	0.00	7.37	227.65	0.00
19	149.40	36.54	15.00	10.00	10.00	21.74	6.67	143.33	407.92
20	135.44	33.38	15.00	10.00	10.00	26.85	5.68	143.33	499.07
21	105.82	35.49	15.01	10.01	14.48	27.16	3.97	182.80	504.65
22	87.21	24.82	15.01	10.01	21.98	25.67	2.71	249.46	478.02
23	88.51	25.81	15.12	10.12	23.92	0.00	2.47	266.84	0.00
24	72.98	22.36	15.28	0.00	22.11	0.00	1.73	250.64	0.00

### 8.6.2 AC модел

AC моделот на IEEE 30 bus system се состои од 30 јазли, 6 генератори, 2 компензатори и 41 вод. Оптимизациониот период изнесува 24 часа, кој е поделен во 24 временски интервали со резолуција од 1 час. Минималниот и максималниот напон на секој од јазлите изнесува 0,9 р.и. и 1,1 р.и. респективно. Максималното активно оптоварување и максималното реактивно оптоварување во системот изнесуваат 283,4 MW и 126,2 MVar респективно.

Податоците за системот се преземени од [63, 69, 84, 149-150]. Податоците за термоелектраните и хидроелектраните се прикажани во табелите 8.46 и 8.47. Податоците за компензаторите, јазлите и преносната мрежа, респективно се прикажани во табелите 8.31, 8.32 и 8.33. Податоците за природниот доток на вода во акумулациите се прикажани во табела 8.40. Податоците за оптоварувањето во системот т.е. факторот на побарувачка (анг. Demand Factor –  $DF$ ) во однос на максималното активно и реактивно оптоварување, се прикажани во табела 8.48.

Предложениот реално-кодиран NSAGA е применет на персонален компјутер со конфигурација: Windows 10 system, Intel Core i7-9750H CPU@2.60GHZ, 16 GB RAM, како и MATLAB R2020a. Евалуацијата на AC моделот на IEEE 30 bus system е прикажана во табелата 8.49.

Табела 8.46 Податоци за термоелектраните за IEEE 30 bus system (АС модел)

	јазол	$a_t$ (€/h)	$b_t$ (€/MW)	$c_t$ (€/MW <sup>2</sup> )	$P_{GT,t}^{\min}$ (MW)	$P_{GT,t}^{\max}$ (MW)	$Q_{GT,t}^{\min}$ (MVA <sub>r</sub> )	$Q_{GT,t}^{\max}$ (MVA <sub>r</sub> )
$P_{GT,1}$	1	0	2.00	0.00375	50	200	-	-
$P_{GT,2}$	2	0	1.75	0.01750	20	80	-20	100
$P_{GT,3}$	5	0	1.00	0.06250	15	50	-15	80
$P_{GT,4}$	8	0	3.25	0.00834	10	35	-15	60
	$URT_t$ (MW)	$DRT_t$ (MW)						
$P_{GT,1}$	65	85						
$P_{GT,2}$	12	22						
$P_{GT,3}$	12	15						
$P_{GT,4}$	8	16						

-нема ограничување за балансен генератор

Табела 8.47 Податоци за хидроелектраните за IEEE 30 bus system - АС модел (од mcf во m<sup>3</sup>)

	јазол	$\alpha_h$ (m <sup>3</sup> /h)	$\beta_h$ (m <sup>3</sup> /MW)	$\gamma_h$ (m <sup>3</sup> /MW <sup>2</sup> )	$V_{k,h}$ (m <sup>3</sup> )	$P_{GH,h}^{\min}$ (MW)	$P_{GH,h}^{\max}$ (MW)
$P_{GH,1}$	11	56.067	8.665	0.0061	5663.37	10	30
$P_{GH,2}$	13	26.505	17.33	0.0100	11326.74	12	40
	$Q_{GH,h}^{\min}$ (MVA <sub>r</sub> )	$Q_{GH,h}^{\max}$ (MVA <sub>r</sub> )	$URH_h$ (MW)	$DRH_h$ (MW)			
$P_{GH,1}$	-10	50	8	16			
$P_{GH,2}$	-15	60	8	16			

Табела 8.48 Податоци за оптоварувањето во системот за IEEE 30 bus system - АС модел

$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$DF$	0.59	0.69	0.81	0.94	1.00	0.96	0.87	0.75	0.68	0.57	0.52	0.56
$j$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$DF$	0.60	0.65	0.73	0.82	0.87	0.85	0.83	0.79	0.72	0.64	0.57	0.46

Табела 8.49 Евалуација на IEEE 30 bus system- АС модел

Термоелектрани	Хидроелектрани	$R$ (MW)	$N_{pop}$	$mgen$	Бр. на независни симулации
4	2	$0.1 \cdot P_{P,max}$	200	300	50

Во табелите 8.50, 8.51 и 8.52 е прикажано решението на АС моделот на оптимизациониот потпроблем SHTS, на IEEE 30 bus system со примена на новопредложениот алгоритам NSAGA.

Табела 8.50 Оптимално решение на IEEE 30 bus system- AC модел (1 дел)

	$P_{GT,1}$ (MW)	$P_{GT,2}$ (MW)	$P_{GT,3}$ (MW)	$P_{GT,4}$ (MW)	$P_{GH,1}$ (MW)	$P_{GH,2}$ (MW)	$Q_{S,1}$ (MVar)	$Q_{S,2}$ (MVar)	$S_L$ (MVA)
1	61.88	35.86	17.13	13.06	22.61	18.37	11.73	2.43	12.19
2	103.82	32.90	15.01	13.46	22.61	12.00	7.85	4.16	16.24
3	132.84	42.62	20.78	11.13	10.00	17.30	10.38	0.75	22.72
4	168.52	43.58	18.17	17.26	10.00	17.93	15.71	4.30	33.93
5	180.62	45.31	19.11	13.58	10.00	25.12	19.00	2.12	40.46
6	160.10	44.36	18.52	10.00	14.03	33.16	7.87	4.30	32.12
7	122.14	46.15	30.25	13.24	22.61	17.15	5.55	1.02	23.61
8	111.79	41.07	15.14	10.00	19.45	20.61	9.91	4.30	20.15
9	97.10	31.10	15.10	10.93	22.61	18.70	18.05	3.94	14.95
10	70.77	25.06	15.08	10.16	22.56	19.95	19.00	4.26	11.40
11	58.46	24.59	15.02	10.54	22.61	17.27	12.26	4.30	7.14
12	78.92	31.26	15.03	10.18	10.00	17.40	13.29	4.30	11.11
13	92.42	28.06	15.06	10.27	10.00	17.28	4.76	3.89	12.22
14	97.72	29.52	16.92	16.94	10.00	17.37	19.00	1.51	14.12
15	123.35	33.81	15.19	11.55	10.00	19.63	19.00	2.69	21.39
16	143.47	37.27	16.50	10.00	14.52	17.39	10.38	3.76	28.06
17	136.63	39.59	17.57	10.01	22.61	25.44	17.69	2.23	23.68
18	136.99	51.61	16.98	10.72	14.32	17.53	19.00	0.46	27.98
19	107.88	56.20	21.73	15.20	22.61	17.32	6.17	2.13	21.00
20	108.83	66.90	16.23	10.02	10.00	18.85	9.92	1.58	23.03
21	106.55	48.78	15.69	10.83	10.00	17.58	13.46	3.98	20.90
22	91.64	28.73	15.13	14.59	10.00	25.02	17.15	2.85	12.74
23	68.20	25.37	15.10	11.50	10.00	33.20	18.34	3.98	10.05
24	51.08	22.61	0.00	10.00	10.00	40.00	4.44	4.30	11.04

Табела 8.51 Оптимално решение на IEEE 30 bus system - AC модел (2 дел)

$j$	$U_{G,1}$ (pu)	$U_{G,2}$ (pu)	$U_{G,3}$ (pu)	$U_{G,4}$ (pu)	$U_{G,5}$ (pu)	$U_{G,6}$ (pu)	$Q_{t,1}$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_{t,2}$ (m <sup>3</sup> /h)
1	1.0581	1.0888	1.1000	1.0731	1.0632	1.1000	255.12	348.18
2	1.0651	1.0633	1.0741	1.0639	1.1000	1.0854	255.12	235.91
3	1.0795	1.0741	1.0755	1.0684	1.0726	1.0496	143.33	329.36
4	1.0870	1.0758	1.0871	1.0801	1.0533	1.0830	143.33	340.42
5	1.0684	1.0736	1.0864	1.0756	1.1000	1.0922	143.33	468.18
6	1.0873	1.0824	1.0896	1.0664	1.0824	1.0764	178.82	612.17
7	1.0595	1.0556	1.0747	1.0616	1.0703	1.1000	255.12	326.58
8	1.0499	1.0629	1.0639	1.0716	1.0772	1.0729	226.90	387.88
9	1.0706	1.0847	1.0697	1.0721	1.0779	1.1000	255.12	354.04
10	1.0492	1.0643	1.0648	1.0813	1.0723	1.1000	254.67	376.27
11	1.0864	1.0856	1.0769	1.0642	1.0627	1.0752	255.12	328.81
12	1.0478	1.0645	1.0492	1.0475	1.0760	1.0650	143.33	331.02
13	1.0683	1.0780	1.0777	1.0743	1.1000	1.0729	143.33	328.88
14	1.0666	1.0758	1.0741	1.0563	1.0816	1.0864	143.33	330.58
15	1.0683	1.0811	1.1000	1.0702	1.0783	1.0732	143.33	370.51
16	1.0594	1.0823	1.0812	1.0567	1.0895	1.1000	183.15	330.95
17	1.0979	1.0918	1.0609	1.0796	1.1000	1.0697	255.12	473.80
18	1.0683	1.0883	1.0889	1.0763	1.1000	1.0707	181.37	333.38

19	1.0596	1.0625	1.0667	1.0613	1.0914	1.0760	255.12	329.59
20	1.0693	1.0981	1.0699	1.0808	1.0724	1.1000	143.33	356.70
21	1.0683	1.1000	1.1000	1.0697	1.0618	1.0738	143.33	334.34
22	1.0721	1.0686	1.0635	1.0820	1.0807	1.1000	143.33	466.38
23	1.0689	1.0728	1.0726	1.0811	1.0767	1.0465	143.33	612.81
24	1.0633	1.0951	1.0971	1.0767	1.0755	1.0814	143.33	735.71

Табела 8.52 Оптимално решение на IEEE 30 bus system - AC модел (3 дел)

$j$	$Q_{GT,1}$ (MVar)	$Q_{GT,2}$ (MVar)	$Q_{GT,3}$ (MVar)	$Q_{GT,4}$ (MVar)	$Q_{GH,1}$ (MVar)	$Q_{GH,2}$ (MVar)
1	-90.64	59.57	39.96	-1.91	-9.16	9.34
2	-32.30	-10.26	39.32	13.97	8.82	8.74
3	-26.08	2.61	39.52	33.23	2.34	-1.47
4	-24.07	-13.97	56.18	47.86	-8.37	9.35
5	-64.66	19.75	60.97	43.78	7.10	12.14
6	-32.74	11.65	59.16	25.22	5.26	8.29
7	-32.09	-17.55	53.16	35.63	3.23	22.31
8	-67.19	24.10	32.00	40.81	1.98	5.81
9	-63.38	45.82	16.63	8.99	-4.86	8.84
10	-65.67	13.85	15.86	29.78	-8.03	7.90
11	-17.11	12.44	16.41	-12.22	-7.71	-0.57
12	-62.55	49.20	11.40	-1.01	2.48	2.20
13	-53.49	22.49	24.80	15.48	6.75	0.00
14	-51.14	31.23	30.32	-6.44	-0.14	6.91
15	-66.67	27.16	56.28	11.18	-2.60	0.65
16	-90.39	72.17	44.58	4.86	5.58	16.17
17	-24.42	25.18	11.81	30.31	5.29	-1.35
18	-83.96	56.23	44.44	26.57	5.49	0.68
19	-41.22	5.56	40.84	29.41	10.38	10.67
20	-94.60	88.31	13.89	31.11	-3.98	12.37
21	-98.90	87.53	43.25	2.89	-7.43	1.28
22	-28.22	-13.86	15.75	30.69	-4.47	8.14
23	-36.45	1.43	19.04	26.13	-4.08	-12.44
24	-90.28	70.46	29.80	-7.67	-4.74	-0.89

Во табелата 8.53 е прикажана компаративната анализа на решенијата на DC и AC моделот на IEEE 30 bus system, со предложението NSAGA.



Табела 8.53 Споредба на добиените резултати за IEEE 30 bus system

	DC модел	AC модел	Разлика AC-DC (%)
$FT_{best}$ (€)	<b>10090.00</b>	<b>10991.02</b>	<b>8.19</b>
$FT_{mean}$ (€)	<b>10436.37</b>	<b>10998.50</b>	<b>5.11</b>
$FT_{worst}$ (€)	<b>10865.32</b>	<b>11013.48</b>	<b>1.35</b>
Ст.дев. (€)	<b>239.65</b>	<b>21.88</b>	<b>-995.22</b>
$CPU_{time}$ (s)	<b>69.86</b>	<b>74.12</b>	<b>5.75</b>
Број на управувачки променливи	<b>144</b>	<b>312</b>	<b>53.85</b>
Број на ограничувања	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>21.43</b>
Успешност (%)	<b>99</b>	<b>100</b>	<b>1.020</b>

**СЛУЧАЈ ЗА АНАЛИЗА:  
SHORT-TERM HYDRO-  
THERMAL-WIND  
SCHEDULING (SHTWS)  
МОДЕЛИРАНА СО АС  
МОДЕЛ И НЕЈЗИНА  
ПРИМЕНА НА  
МОДИФИЦИРАН IEEE  
30 BUS TEST SYSTEM**

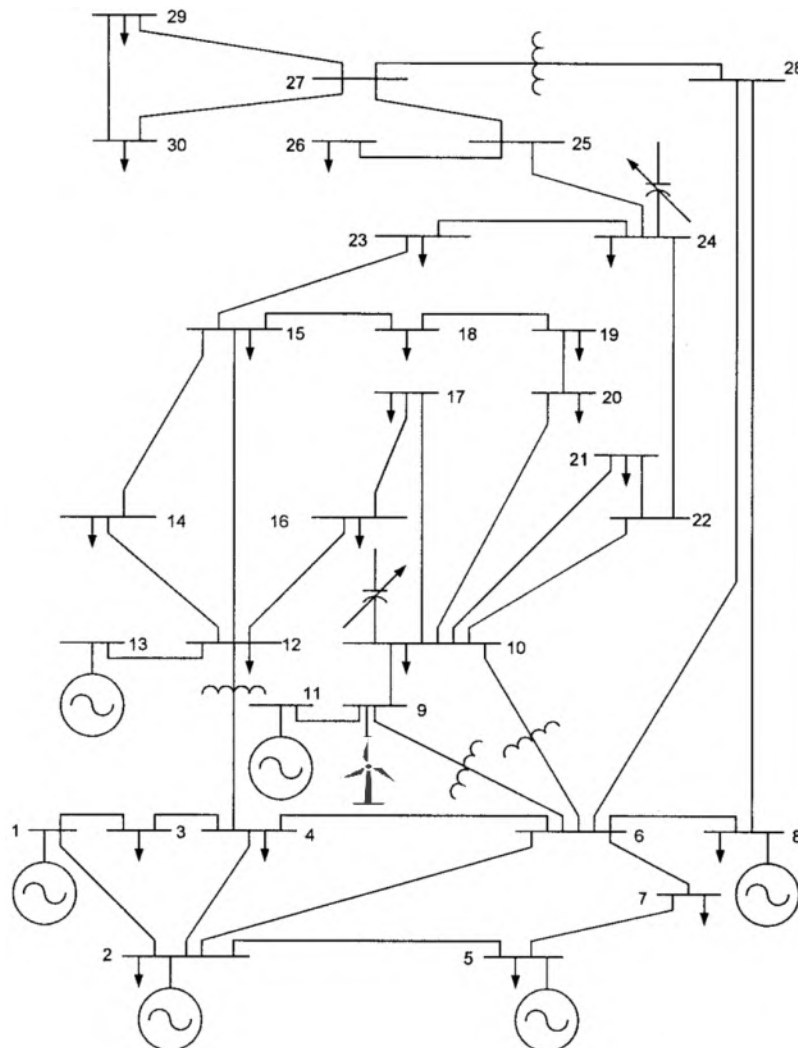
Поглавје

9

## 9 СЛУЧАЈ ЗА АНАЛИЗА: SHORT-TERM HYDRO-THERMAL-WIND SCHEDULING (SHTWS) МОДЕЛИРАНА СО АС МОДЕЛ И НЕЈЗИНА ПРИМЕНА НА МОДИФИЦИРАН IEEE 30 BUS TEST SYSTEM

Во литературата постојат многу практични тест системи, кои истражувачите ги користат за валидација и примена на своите истражувања, во реално време. Во оваа докторска дисертација, предложениот NSAGA ќе биде применет на модифициран IEEE 30 bus system.

Модифицираниот IEEE 30 bus system се состои од 30 јазли, 7 генератори (од кои седмиот генератор што ја претставува ветерната електрана се наоѓа во јазолот 9), 2 компензатори и 41 вод. Оптимизациониот период изнесува 24 часа, којшто е поделен во 24 временски интервали со резолуција од 1 час. Минималниот и максималниот напон на секој од јазлите изнесува 0,9 р.у. и 1,1 р.у. ретроспективно. Максималното активно оптоварување и максималното реактивно оптоварување во системот изнесуваат 283,4 MW и 126,2 MVar респективно. Еднополната шема на модифицираниот IEEE 30 bus system, е прикажана на слика 9.1.



Слика 9.1 Еднополна шема на модифициран IEEE 30 bus system

Податоците за системот се преземени од [63, 69, 84, 149-150]. Податоците за термоелектраните и хидроелектраните се прикажани во табелите 9.1 и 9.2. Податоците за компензаторите, јазлите и преносната мрежа, респективно се прикажани во табелите 9.3, 9.4 и 9.5. Податоците за природниот доток на вода во акумулациите се прикажани во табела 9.6. Податоците за оптоварувањето во системот т.е. факторот на побарувачка (анг. Demand Factor –  $DF$ ) во однос на максималното активно и реактивно оптоварување, се прикажани во табела 9.7. Податоците со параметрите на ветроагрегатите се прикажани во табела 9.8[151].

Табела 9.1 Податоци за термоелектраните за модифициран IEEE 30 bus system

	јазол	$a_t$ (€/h)	$b_t$ (€/MW)	$c_t$ (€/MW <sup>2</sup> )	$P_{GT,t}^{\min}$ (MW)	$P_{GT,t}^{\max}$ (MW)	$Q_{GT,t}^{\min}$ (MVA <sub>r</sub> )	$Q_{GT,t}^{\max}$ (MVA <sub>r</sub> )
$P_{GT,1}$	1	0	2.00	0.00375	50	200	-	-
$P_{GT,2}$	2	0	1.75	0.01750	20	80	-20	100
$P_{GT,3}$	5	0	1.00	0.06250	15	50	-15	80
$P_{GT,4}$	8	0	3.25	0.00834	10	35	-15	60
	$URT_t$ (MW)	$DRT_t$ (MW)						
$P_{GT,1}$	65	85						
$P_{GT,2}$	12	22						
$P_{GT,3}$	12	15						
$P_{GT,4}$	8	16						

-нема ограничување за балансен генератор

Табела 9.2 Податоци за хидроелектраните за модифициран IEEE 30 bus system (од mcf во m<sup>3</sup>)

	јазол	$\alpha_h$ (m <sup>3</sup> /h)	$\beta_h$ (m <sup>3</sup> /MW)	$\gamma_h$ (m <sup>3</sup> /MW <sup>2</sup> )	$V_{k,h}$ (m <sup>3</sup> )	$P_{GH,h}^{\min}$ (MW)	$P_{GH,h}^{\max}$ (MW)
$P_{GH,1}$	11	56.067	8.665	0.0061	5663.37	10	30
$P_{GH,2}$	13	26.505	17.33	0.0100	11326.74	12	40
	$Q_{GH,h}^{\min}$ (MVA <sub>r</sub> )	$Q_{GH,h}^{\max}$ (MVA <sub>r</sub> )	$URH_h$ (MW)	$DRH_h$ (MW)			
$P_{GH,1}$	-10	50	8	16			
$P_{GH,2}$	-15	60	8	16			

Табела 9.3 Податоци за компензаторите за модифициран IEEE 30 bus system

	јазол	$Q_{S,s}^{\min}$ (MVA <sub>r</sub> )	$Q_{S,s}^{\max}$ (MVA <sub>r</sub> )
$Q_{S,1}$	10	0	19
$Q_{S,2}$	24	0	4.3

Табела 9.4 Податоци за јазлите за модифициран IEEE 30 bus system

јазол	тип	$U_b$ (kV)	$P_{Lm}$ (MW)	$Q_{Lm}$ (MW)	$Q_{Sm}$ (MW)	област	$U_{min}$ (pu)	$U_{max}$ (pu)
1	3	135	0	0	0	1	0.90	1.10
2	2	135	21.7	12.7	0	1	0.90	1.10
3	1	135	2.4	1.2	0	1	0.90	1.10
4	1	135	7.6	1.6	0	1	0.90	1.10
5	2	135	94.2	19.0	0	1	0.90	1.10
6	1	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
7	1	135	22.8	10.9	0	1	0.90	1.10
8	2	135	30.0	30.0	0	1	0.90	1.10
9	1	135	-6.93*	1.16*	0	1	0.90	1.10
10	1	135	5.8	2.0	0	1	0.90	1.10
11	2	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
12	1	135	11.2	7.5	0	1	0.90	1.10
13	2	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
14	1	135	6.2	1.6	0	1	0.90	1.10
15	1	135	8.2	2.5	0	1	0.90	1.10
16	1	135	3.5	1.8	0	1	0.90	1.10
17	1	135	9.0	5.8	0	1	0.90	1.10
18	1	135	3.2	0.9	0	1	0.90	1.10
19	1	135	9.5	3.4	0	1	0.90	1.10
20	1	135	2.2	0.7	0	1	0.90	1.10
21	1	135	17.5	11.2	0	1	0.90	1.10
22	1	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
23	1	135	3.2	1.6	0	1	0.90	1.10
24	1	135	8.7	6.7	0	1	0.90	1.10
25	1	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
26	1	135	3.5	2.3	0	1	0.90	1.10
27	1	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
28	1	135	0	0.0	0	1	0.90	1.10
29	1	135	2.4	0.9	0	1	0.90	1.10
30	1	135	10.6	1.9	0	1	0.90	1.10

\* вредност за интервал 1, вредностите за другите интервали се прикажани во табела 8.62

Табела 9.5 Податоци за преносната мрежа за модифициран IEEE 30 bus system

број на вод	почетен јазол	краен јазол	$R$ (pu)	$X$ (pu)	$B$ (pu)	$S_{GRg}^{max}$ (MVA)	статус
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0528	130	1
2	1	3	0.0452	0.1852	0.0408	130	1
3	2	4	0.0570	0.1737	0.0368	65	1
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0084	130	1
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0418	130	1
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0374	65	1
7	4	6	0.0119	0.0414	0.0090	90	1

8	5	7	0.0460	0.1160	0.0204	130	1
9	6	7	0.0267	0.0820	0.0170	130	1
10	6	8	0.0120	0.0420	0.0090	32	1
11	6	9	0.0000	0.2080	0.0000	65	1
12	6	10	0.0000	0.2230	0.0000	32	1
13	9	11	0.0000	0.2080	0.0000	65	1
14	9	10	0.0000	0.1100	0.0000	65	1
15	4	12	0.0000	0.2560	0.0000	65	1
16	12	13	0.0000	0.1400	0.0000	65	1
17	12	14	0.1231	0.2559	0.0000	32	1
18	12	15	0.0662	0.1304	0.0000	32	1
19	12	16	0.0945	0.1987	0.0000	32	1
20	14	15	0.2210	0.1997	0.0000	16	1
21	16	17	0.0824	0.1932	0.0000	16	1
22	15	18	0.1070	0.2185	0.0000	16	1
23	18	19	0.0639	0.1292	0.0000	16	1
24	19	20	0.0340	0.0680	0.0000	32	1
25	10	20	0.0936	0.2090	0.0000	32	1
26	10	17	0.0324	0.0845	0.0000	32	1
27	10	21	0.0348	0.0749	0.0000	32	1
28	10	22	0.0727	0.1499	0.0000	32	1
29	21	22	0.0116	0.0236	0.0000	32	1
30	15	23	0.1000	0.2020	0.0000	16	1
31	22	24	0.1150	0.1790	0.0000	16	1
32	23	24	0.1320	0.2700	0.0000	16	1
33	24	25	0.1885	0.3292	0.0000	16	1
34	25	26	0.2544	0.3800	0.0000	16	1
35	25	27	0.1093	0.2087	0.0000	16	1
36	28	27	0.0000	0.3690	0.0000	65	1
37	27	29	0.2198	0.4153	0.0000	16	1
38	27	30	0.3202	0.6027	0.0000	16	1
39	29	30	0.2399	0.4533	0.0000	16	1
40	8	28	0.0636	0.2000	0.0428	32	1
41	6	28	0.0169	0.0599	0.0130	32	1

Табела 9.6 Податоци за природниот доток на вода во акумулациите за модифициран IEEE 30 bus system

$P_{GH1}$	$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	$Q_{d,h,j}$ ( $m^3/h$ )	100	90	80	70	60	70	80	90	100	110	120	100
	$j$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	$Q_{d,h,j}$ ( $m^3/h$ )	110	120	110	100	90	80	70	60	70	80	90	100
$P_{GH2}$	$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	$Q_{d,h,j}$ ( $m^3/h$ )	80	80	90	90	80	70	60	70	80	90	90	80
	$j$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	$Q_{d,h,j}$ ( $m^3/h$ )	80	90	90	80	70	60	70	80	90	90	80	80

Табела 9.7 Податоци за оптоварувањето во системот за модифициран IEEE 30 bus system

$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$DF$	0.59	0.69	0.81	0.94	1.00	0.96	0.87	0.75	0.68	0.57	0.52	0.56
$j$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$DF$	0.60	0.65	0.73	0.82	0.87	0.85	0.83	0.79	0.72	0.64	0.57	0.46

Табела 9.8 Податоци за ветроагрегатите на ветерната електрана за модифициран IEEE 30 bus system

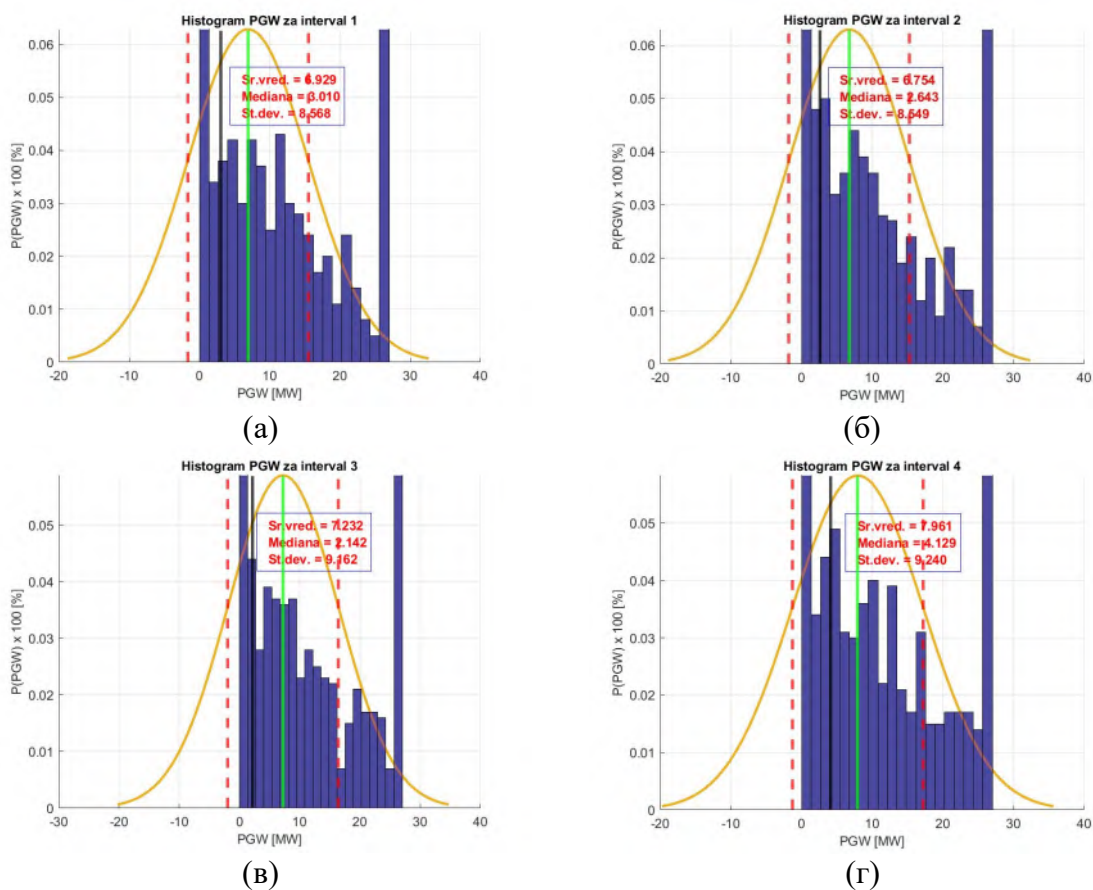
Генерални податоци		
Опис	Ознака	Вредност
Број на ветроагрегати	$n_t$	18
Инсталирана моќ [MW]	$P_{GW,w}$	27
Податоци за ветерна турбина		
Тип: NEG Micon NM72C 1.5MW		
Номинална моќност [MW]	$P_{WTn}$	1.5
Брзина на вклучување [m/s]	$V_{T,min}$	4
Номинална брзина [m/s]	$V_{T,n}$	13
Брзина на исклучување [m/s]	$V_{T,max}$	20
Податоци за асинхронен генератор		
Тип: Асинхронен генератор со кафезен ротор (анг. Squirrel Cage Induction Generator - SCIG)		
Номинална моќност [MW]	$P_{GWn}$	1.5
Номинален напон [kV]	$U_{GWn}$	0.69
Номинална фреквенција [Hz]	$f_{GWn}$	60
Отпор на статор [p.u.]	$R_S$	0.0047
Отпор на ротор [p.u.]	$R_R$	0.0021
Индуктивитет на статор [p.u.]	$L_S$	0.08
Индуктивитет на ротор [p.u.]	$L_R$	0.0478
Индуктивитет на магнетизирање [p.u.]	$L_M$	6.8

Блок шемата на ветроагрегат со асинхронен генератор со SCIG, е прикажана на слика 9.2.

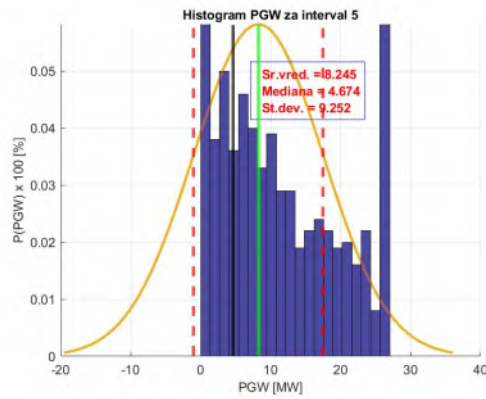


Слика 9.2 Блок шема на ветроагрегат со SCIG

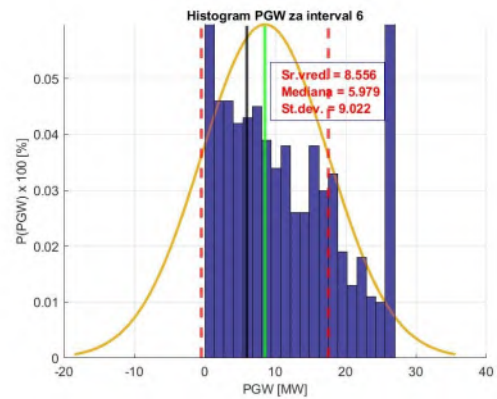
Добиените хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на ветерната електрана, добиени со методата Монте Карло за симулирани 1.000 сценарија, за интервал 1 до 24 респективно, се прикажани на слика 9.3.



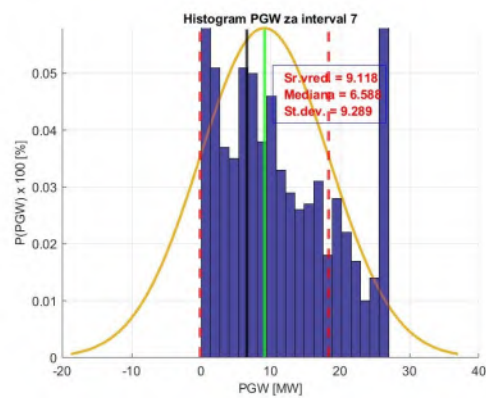




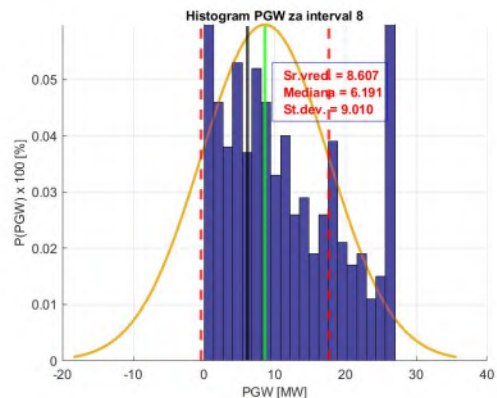
(д)



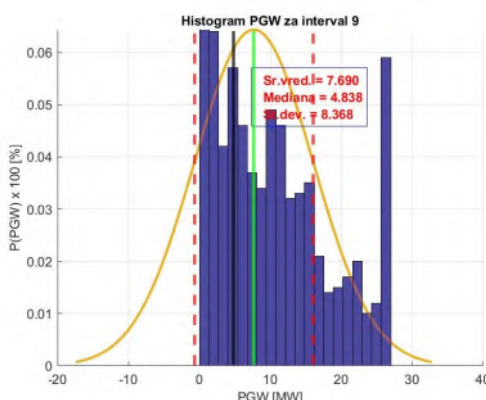
(ѓ)



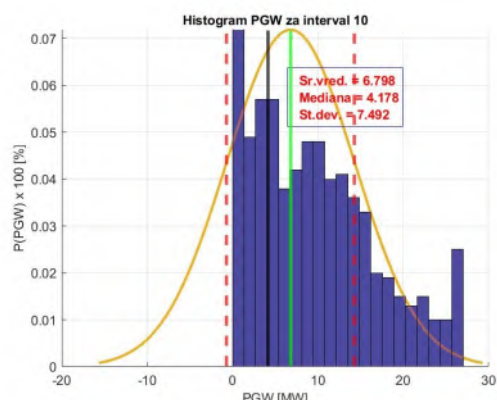
(е)



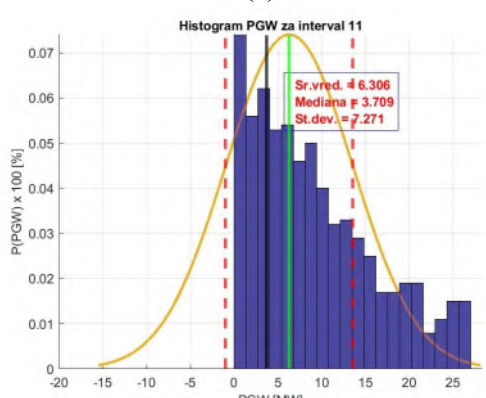
(ж)



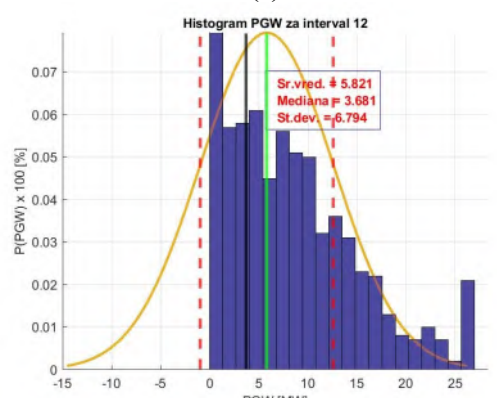
(з)



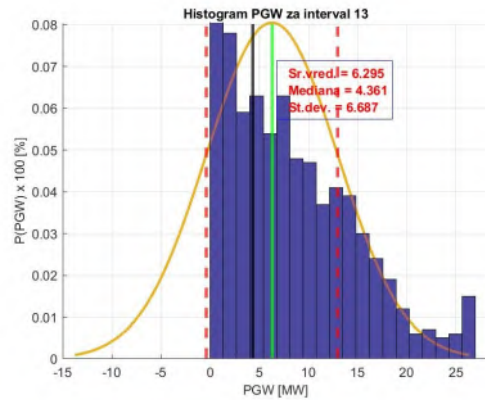
(с)



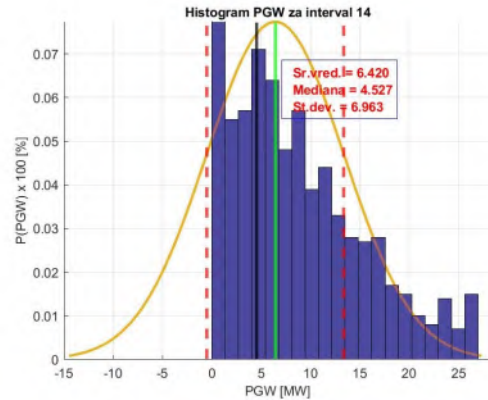
(и)



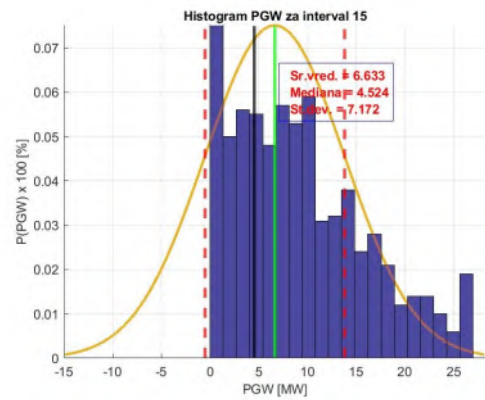
(ј)



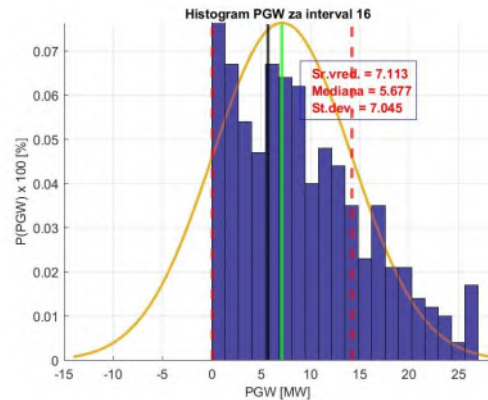
(К)



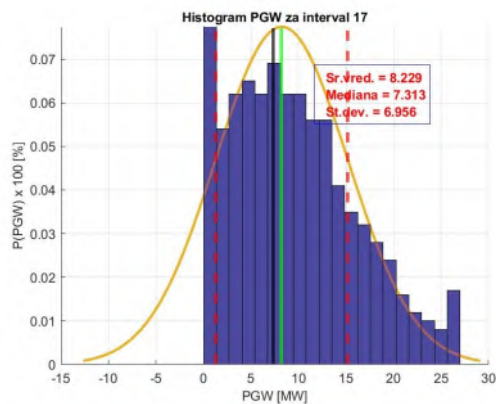
(Л)



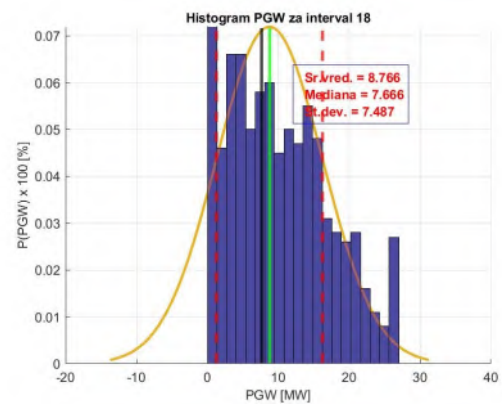
(Љ)



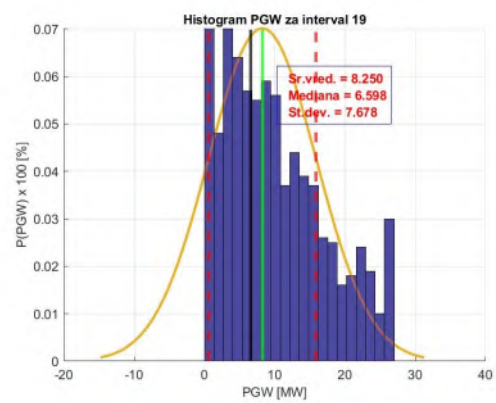
(М)



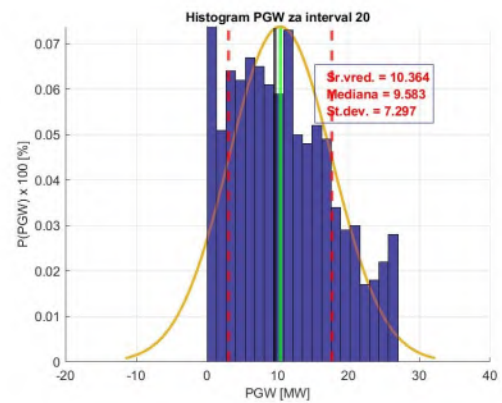
(Н)



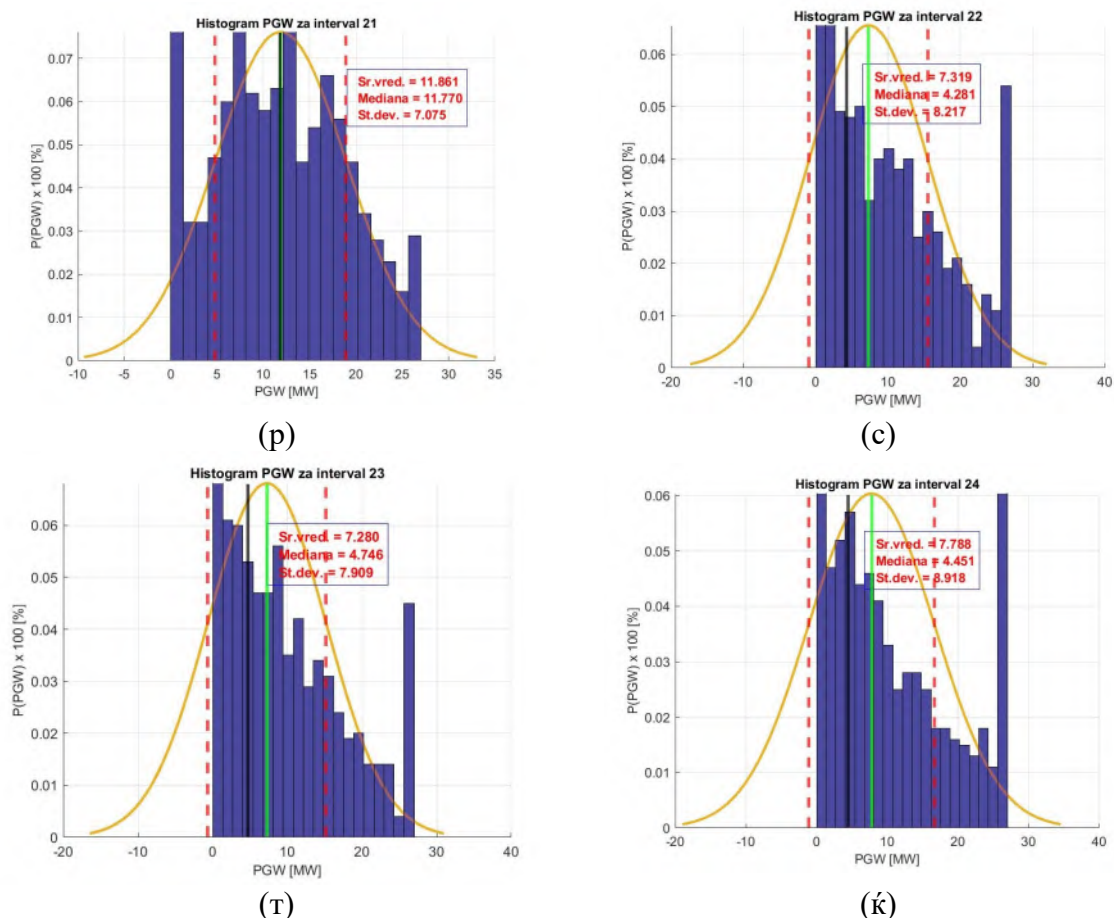
(Ѓ)



(О)



(П)



Слика 9.3 Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на ветерната електрана за интервал 1 – 24

Со цел компаративна анализа на вкупните трошоци за работа во термоелектраните, помеѓу оптимизационите проблеми SHTS и SHTWS, најпрво оптимизациониот проблем SHTWS со AC модел ќе биде решен во согласност со добиените средни вредности за активната и реактивната моќност на ветерната електрана, коишто се прикажани во табелата 9.9.

По решавањето на проблемот SHTWS, ќе се даде осврт на главната цел на истражувањето на докторската дисертација, т.е. ќе бидат прикажани варијациите на излезните параметри на оптимизациониот проблем SHTWS преку соодветни хистограми, коишто се последица на стохастичноста на ветерната енергија.

Табела 9.9 Средни вредности за активната и реактивната моќност на ветерната електрана од симулирани 1.000 сценарија

$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_{GW,w,j}$ [MW]	6.93	6.75	7.23	7.96	8.24	8.56	9.12	8.61	7.69	6.80	6.31	5.82
$Q_{GW,w,j}$ [MVar]	1.16	1.15	1.21	1.26	1.28	1.28	1.34	1.29	1.19	1.08	1.05	1.00
$j$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$P_{GW,w,j}$ [MW]	6.29	6.42	6.63	7.11	8.23	8.77	8.25	10.36	11.86	7.32	7.28	7.79
$Q_{GW,w,j}$ [MVar]	1.02	1.04	1.06	1.08	1.14	1.20	1.18	1.31	1.42	1.16	1.13	1.23

Предложениот реално-кодиран NSAGA е применет на персонален компјутер со конфигурација: Windows 10 system, Intel Core i7-9750H CPU@2.60GHZ, 16 GB RAM, како и MATLAB R2020a. Евалуацијата на случајот за анализа т.е. модифициран IEEE 30 bus system е прикажана во табела 9.10, додека евалуацијата на неговите излезни параметри, за приказ на стохастичноста, е прикажана во табела 9.11.

Табела 9.10 Евалуација на модифициран IEEE 30 bus system

Термоелектрани	Хидроелектрани	$R$ (MW)	$N_{pop}$	$mgen$	Бр. на независни симулации
4	2	$0.1 \cdot P_{P,max}$	200	300	50

Табела 9.11 Евалуација на излезните параметри на модифициран IEEE 30 bus system

Опис	Ознака	Димензија
3D матрица со активната моќност на генераторите	$P_G$	$NG \times J \times n_{scen}$
3D матрица со напоните на генераторите	$U_G$	$NG \times J \times n_{scen}$
3D матрица со реактивната моќност на компензаторите	$Q_S$	$NS \times J \times n_{scen}$
3D матрица со напоните на јазлите на потрошувачите	$U_{NL}$	$NL \times J \times n_{scen}$
3D матрица со фазните агли на јазлите (меѓу кои и slack јазлот)	$\theta_{NB}$	$NB \times J \times n_{scen}$
3D матрица со реактивната моќност на генераторите	$Q_G$	$NG \times J \times n_{scen}$
3D матрица со привидната моќност низ водоците	$S_{GR}$	$G \times J \times n_{scen}$
3D матрица со опт. протоци на хидроелектраните	$Q_t$	$NH \times J \times n_{scen}$
2D матрица со вкупните трошоци за работа	$F_T$	$n_{scen} \times 1$
2D матрица со вкупните загуби на моќност во системот	$S_L$	$n_{scen} \times 1$

Изработениот алгоритам во програмскиот пакет MATLAB овозможува графички приказ на добиеното оптимално решение, т.е. нуди графички приказ на добиените оптимални текови на моќност, како и на добиените моќности низ преносните водови, за целокупниот оптимизационен период од 24 часа. Поради големата димензионалност на проблемот, односно големиот број излезни параметри, како за пример, на сликите 9.4 и 9.5 респективно се прикажани добиените резултати за првиот интервал, т.е. за  $j = 1$ .

TEKOVI NA MOKNOST ZA INTERVAL 1

#####

OPTIMALNI TEKOVNI NA MOKNOST: NJUTN-RAFSONOV METOD

Jaz Br	V pu	Teta Stepeni	Sinj = f(V,θ)		Sgen		Spotr		Disbalans	
			Pinj(MW)	Qinj(MVar)	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Pl(MW)	Ql(MVar)	ΔP(MW)	ΔQ(MVar)
1	1.0847	0.0000	48.751	-7.885	48.751	-7.885	0.000	0.000	0.000	0.000
2	1.0812	-0.9530	14.051	3.243	26.762	10.682	12.711	7.439	0.000	0.000
3	1.0758	-1.2751	-1.406	-0.703	0.000	-0.000	1.406	0.703	-0.000	0.000
4	1.0728	-1.5286	-4.452	34.312	0.000	35.249	4.452	0.937	-0.000	0.000
5	1.0675	-3.5900	-36.681	3.220	18.496	14.350	55.177	11.129	0.000	0.000
6	1.0680	-1.8536	-0.000	12.631	0.000	12.631	0.000	0.000	-0.000	0.000
7	1.0641	-2.8504	-13.355	-6.385	0.000	0.000	13.355	6.385	0.000	0.000
8	1.0597	-1.9063	-7.572	-25.054	10.000	-7.481	17.572	17.572	0.000	0.000
9	1.0697	-0.7895	6.930	-13.514	0.000	-12.354	-6.930	1.160	0.000	0.000
10	1.0787	-2.2495	-3.397	20.708	0.000	21.879	3.397	1.171	-0.000	0.000
11	1.0591	2.3679	30.000	-4.595	30.000	-4.595	0.000	0.000	0.000	0.000
12	1.0712	-1.5180	-6.560	-37.146	0.000	-32.753	6.560	4.393	0.000	0.000
13	1.0755	0.3260	26.479	3.760	26.479	3.760	0.000	0.000	0.000	0.000
14	1.0650	-2.0782	-3.632	-0.937	0.000	0.000	3.632	0.937	0.000	0.000
15	1.0643	-2.2341	-4.803	-1.464	0.000	0.000	4.803	1.464	0.000	0.000
16	1.0699	-2.0071	-2.050	-1.209	0.000	-0.155	2.050	1.054	-0.000	0.000
17	1.0732	-2.2836	-5.272	-3.244	0.000	0.153	5.272	3.397	0.000	0.000
18	1.0625	-2.6240	-1.874	-0.527	0.000	0.000	1.874	0.527	0.000	0.000
19	1.0632	-2.7492	-5.565	-1.992	0.000	-0.000	5.565	1.992	-0.000	0.000
20	1.0667	-2.6581	-1.289	-0.410	0.000	0.000	1.289	0.410	0.000	0.000
21	1.0721	-2.5670	-10.251	-6.560	0.000	-0.000	10.251	6.560	-0.000	0.000
22	1.0725	-2.5836	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23	1.0633	-2.6952	-1.874	-0.937	0.000	-0.000	1.874	0.937	-0.000	0.000
24	1.0668	-3.1157	-5.096	3.897	0.000	7.822	5.096	3.924	-0.000	0.000
25	1.0583	-3.4277	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	0.000
26	1.0485	-3.6530	-2.050	-1.347	0.000	-0.000	2.050	1.347	-0.000	0.000
27	1.0581	-3.4897	0.000	-9.410	0.000	-9.410	0.000	0.000	-0.000	0.000
28	1.0657	-2.0424	0.000	3.221	0.000	3.221	0.000	0.000	0.000	0.000
29	1.0471	-4.1574	-1.406	-0.527	0.000	0.000	1.406	0.527	0.000	0.000
30	1.0407	-4.6299	-6.209	-1.113	0.000	-0.000	6.209	1.113	-0.000	0.000
Vkupno			1.417	-39.967	160.488	35.114	159.071	75.081		

Слика 9.4 Графички приказ на оптимални текови на моќност (оптимални вредности за напоните и фазните агли на јазлите) за интервал 1 за модифициран IEEE 30 bus system со примена на NSAGA

OPTIMALNI TEKOVNI NA MOKNOST: NJUTN-RAFSONOV METOD

Od Jaz	Do Jaz	Pij MW	Qij MVar	Od Jaz	Do Jaz	Pji MW	Qji MVar	Zagubi		SGR MVA	SGRmax MVA	Opt. %
								MW	MVar			
1	2	32.597	-3.966	2	1	-32.421	4.493	0.176	0.527	32.838	130.000	25.260
1	3	16.153	1.588	3	1	-16.052	-1.218	0.101	0.370	16.231	130.000	12.486
2	4	7.604	2.727	4	2	-7.572	-2.630	0.032	0.097	8.079	65.000	12.429
3	4	14.646	3.362	4	3	-14.621	-3.288	0.026	0.074	15.027	130.000	11.560
2	5	27.160	1.601	5	2	-26.861	-0.345	0.299	1.256	27.207	130.000	20.928
2	6	11.708	4.288	6	2	-11.631	-4.053	0.077	0.234	12.469	65.000	19.183
4	6	17.825	7.399	6	4	-17.786	-7.265	0.039	0.134	19.299	90.000	21.444
5	7	-9.821	7.110	7	5	9.880	-6.960	0.059	0.150	12.124	70.000	17.320
6	7	23.364	-2.297	7	6	-23.235	2.693	0.129	0.396	23.477	130.000	18.059
6	8	7.917	19.028	8	6	-7.872	-18.871	0.045	0.156	20.609	32.000	64.403
6	9	-10.430	-0.793	9	6	10.430	0.988	0.000	0.195	10.477	65.000	16.118
6	10	1.478	-2.119	10	6	-1.478	2.150	0.000	0.032	2.609	32.000	8.153
9	11	-30.000	6.303	11	9	30.000	-4.595	0.000	1.708	30.655	65.000	47.161
9	10	26.729	-8.430	10	9	-26.729	9.185	0.000	0.755	28.263	65.000	43.482
4	12	-0.089	0.753	12	4	0.089	-0.751	-0.000	0.001	0.758	65.000	1.166
12	13	-26.479	-2.894	13	12	26.479	3.760	0.000	0.866	26.745	65.000	41.146
12	14	4.551	0.399	14	12	-4.528	-0.352	0.022	0.047	4.568	32.000	14.276
12	15	11.000	0.145	15	12	-10.930	-0.008	0.070	0.138	11.001	32.000	34.377
12	16	4.286	-1.343	16	12	-4.269	1.377	0.017	0.035	4.491	32.000	14.034
14	15	0.897	-0.585	15	14	-0.894	0.587	0.002	0.002	1.071	16.000	6.691
16	17	1.773	-2.587	17	16	-1.766	2.603	0.007	0.017	3.146	16.000	19.661
15	18	3.184	-0.689	18	15	-3.174	0.709	0.010	0.020	3.257	16.000	20.358
18	19	1.299	-1.236	19	18	-1.297	1.240	0.002	0.004	1.795	16.000	11.216
19	20	-4.267	-3.231	20	19	4.276	3.249	0.009	0.017	5.370	32.000	16.781
10	20	5.601	3.740	20	10	-5.564	-3.659	0.036	0.081	6.735	32.000	21.046
10	17	3.070	5.879	17	10	-3.058	-5.847	0.012	0.032	6.633	32.000	20.727
10	21	10.690	4.589	21	10	-10.649	-4.502	0.040	0.087	11.633	32.000	36.353
10	22	5.403	1.860	22	10	-5.383	-1.818	0.020	0.042	5.714	32.000	17.858
21	22	0.399	-2.058	22	21	-0.398	2.059	0.000	0.001	2.097	32.000	6.555
15	23	3.838	-1.355	23	15	-3.823	1.384	0.015	0.030	4.070	16.000	25.436
22	24	5.781	-0.241	24	22	-5.747	0.293	0.033	0.052	5.786	16.000	36.162
23	24	1.948	-2.322	24	23	-1.938	2.344	0.011	0.022	3.041	16.000	19.006
24	25	2.589	1.261	25	24	-2.576	-1.237	0.014	0.024	2.880	16.000	17.999
25	26	2.064	1.368	26	25	-2.050	-1.347	0.014	0.021	2.476	16.000	15.476
25	27	0.511	-0.131	27	25	-0.511	0.132	0.000	0.001	0.528	16.000	3.301
27	28	-7.429	-2.002	28	27	7.429	2.205	0.000	0.203	7.749	65.000	11.922
27	29	3.592	0.912	29	27	-3.565	-0.861	0.027	0.051	3.706	16.000	23.161
27	30	4.111	0.894	30	27	-4.060	-0.799	0.051	0.095	4.207	16.000	26.293
29	30	2.159	0.334	30	29	-2.149	-0.314	0.010	0.020	2.185	16.000	13.655
8	28	0.300	-3.274	28	8	-0.293	3.293	0.006	0.019	3.306	32.000	10.332
6	28	6.906	2.287	28	6	-6.898	-2.259	0.008	0.028	7.275	32.000	22.733
Vкупni zagubi								1.420	8.038			

Слика 9.5 Графички приказ на моќностите и загубите низ преносните водови на SHTWS за интервал 1 за модифициран IEEE 30 bus system со примена на NSAGA

Во табелите 9.12, 9.13 и 9.14 е прикажано решението на оптимизациониот потпроблем SHTWS, добиено врз основа на средните вредности за активната и реактивната излезна моќност на ветерната електрана, на модифициран IEEE 30 bus system со примена на новопредложениот алгоритам NSAGA. Во табелите 9.15, 9.16 и 9.17 ретроспективно е прикажано решението на оптимизациониот потпроблем SHTWS за оптималните вредности на напоните и фазните агли на јазлите, односно привидните моќности низ преносните водови.

Табела 9.12 Оптимално решение на SHTWS за модифициран IEEE 30 bus system (1 дел)

	$P_{GT,1}$ (MW)	$P_{GT,2}$ (MW)	$P_{GT,3}$ (MW)	$P_{GT,4}$ (MW)	$P_{GH,1}$ (MW)	$P_{GH,2}$ (MW)	$Q_{S,1}$ (MVA <sub>r</sub> )	$Q_{S,2}$ (MVA <sub>r</sub> )	$S_L$ (MVA)
1	48.75	26.76	18.50	10.00	30.00	26.48	8.17	3.09	8.16
2	97.37	36.02	15.04	10.00	15.34	18.71	11.07	4.00	13.51
3	125.65	43.99	15.37	10.00	13.44	19.04	5.37	4.30	22.73
4	159.16	45.84	18.24	13.79	10.94	19.12	12.43	2.06	31.91
5	169.24	47.88	19.94	13.49	13.55	19.98	11.15	0.65	35.60
6	161.26	44.56	27.47	10.10	13.47	15.28	9.02	2.96	35.28
7	130.14	41.13	22.06	10.03	17.90	21.06	14.99	4.30	22.01
8	112.89	38.02	15.04	11.17	13.48	19.07	18.75	0.02	21.21
9	86.46	30.44	21.76	10.93	18.94	18.50	10.21	2.34	11.70
10	56.55	35.59	22.35	10.00	14.31	17.38	19.00	4.19	8.52
11	53.24	23.11	15.19	17.65	14.14	18.83	18.50	3.74	6.50
12	62.17	24.90	22.22	14.44	13.31	19.37	0.10	2.25	8.78
13	88.42	20.00	18.14	10.00	10.94	18.82	16.31	2.13	10.91
14	82.49	31.24	23.26	11.31	14.06	19.01	19.00	3.89	11.44
15	116.14	33.47	15.46	10.05	13.45	18.24	9.12	2.63	21.31
16	122.54	37.74	17.63	17.29	14.28	21.20	8.80	4.30	22.59
17	141.99	39.78	17.18	12.43	13.57	18.95	18.58	3.32	24.39
18	122.08	40.45	27.64	17.96	13.86	16.46	14.71	1.97	24.46
19	123.77	40.58	21.02	10.69	13.42	23.36	19.00	3.27	20.33
20	115.28	38.36	15.32	10.74	13.96	26.00	16.23	4.30	19.85
21	78.67	46.25	24.26	11.62	13.42	21.12	10.19	2.69	13.04
22	70.93	48.11	15.22	10.05	13.34	19.63	5.96	3.81	10.71
23	53.53	26.75	15.00	16.85	17.59	26.30	11.77	1.23	9.61
24	49.84	23.37	0.00	10.01	22.76	18.61	10.73	4.30	6.98

Табела 9.13 Оптимално решение на SHTWS за модифициран IEEE 30 bus system (2 дел)

$j$	$U_{G,1}$ (pu)	$U_{G,2}$ (pu)	$U_{G,3}$ (pu)	$U_{G,4}$ (pu)	$U_{G,5}$ (pu)	$U_{G,6}$ (pu)	$Q_{t,1}$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_{t,2}$ (m <sup>3</sup> /h)
1	1.0847	1.0812	1.0675	1.0597	1.0591	1.0755	321.51	492.41
2	1.0939	1.0799	1.0663	1.0647	1.0740	1.1000	190.46	354.25
3	1.0655	1.0699	1.0724	1.0807	1.1000	1.0847	173.62	360.02
4	1.0814	1.0699	1.0800	1.0553	1.0795	1.0497	151.57	361.55
5	1.0746	1.0634	1.0599	1.0532	1.0699	1.0424	174.61	376.77
6	1.0517	1.0667	1.0733	1.0496	1.1000	1.1000	173.86	293.66
7	1.0887	1.0799	1.0711	1.0585	1.0739	1.0687	213.08	395.98
8	1.0496	1.0607	1.0830	1.0521	1.0992	1.0899	173.99	360.68
9	1.0955	1.0768	1.0594	1.0566	1.1000	1.0705	222.35	350.49
10	1.0582	1.0620	1.0794	1.0732	1.0673	1.0720	181.33	330.63
11	1.0750	1.0757	1.0688	1.0748	1.0856	1.0563	179.81	356.32

12	1.0552	1.0802	1.0755	1.0628	1.0724	1.0734	172.45	365.90
13	1.0712	1.0789	1.0538	1.0607	1.0581	1.1000	151.57	356.20
14	1.0632	1.0671	1.0480	1.0689	1.0915	1.0635	179.07	359.56
15	1.0563	1.0737	1.1000	1.0594	1.0554	1.0952	173.68	345.92
16	1.0618	1.0835	1.0836	1.0727	1.0577	1.0698	181.05	398.31
17	1.0988	1.0984	1.0714	1.0749	1.0641	1.0562	174.73	358.44
18	1.0432	1.0722	1.0524	1.0689	1.0999	1.0625	177.30	314.43
19	1.0844	1.0745	1.0543	1.0766	1.0836	1.0811	173.47	436.81
20	1.0722	1.0675	1.0825	1.0573	1.0779	1.0619	178.19	483.77
21	1.0817	1.1000	1.0624	1.0736	1.0631	1.0679	173.42	397.06
22	1.0743	1.0760	1.0571	1.0838	1.0750	1.0748	172.77	370.49
23	1.0738	1.1000	1.0725	1.0699	1.0783	1.0601	210.38	489.25
24	1.0746	1.0746	1.0632	1.0781	1.0785	1.1000	256.40	352.49

Табела 9.14 Оптимално решение на SHTWS за модифициран IEEE 30 bus system (3 дел)

$j$	$Q_{GT,1}$ (MVar)	$Q_{GT,2}$ (MVar)	$Q_{GT,3}$ (MVar)	$Q_{GT,4}$ (MVar)	$Q_{GH,1}$ (MVar)	$Q_{GH,2}$ (MVar)
1	-7.88	10.68	14.35	-7.48	-4.59	3.76
2	1.78	-11.55	19.26	3.58	-2.60	11.86
3	-51.99	6.70	35.98	45.22	8.53	8.40
4	-16.99	-3.93	60.72	23.95	7.85	2.30
5	-19.54	6.47	48.85	40.57	8.20	4.08
6	-78.01	49.59	54.62	19.50	14.27	22.66
7	-15.46	9.93	35.92	12.41	1.49	4.53
8	-62.32	14.12	58.10	3.17	8.87	12.17
9	17.16	-15.30	13.55	-4.53	9.52	1.83
10	-34.79	-17.82	32.99	19.88	-6.97	-0.76
11	-23.47	1.16	11.38	7.27	-1.87	-9.75
12	-75.91	62.90	21.35	2.55	1.36	4.89
13	-45.52	42.43	2.67	1.28	-8.39	12.09
14	-38.52	16.76	3.65	24.06	3.38	-2.63
15	-74.79	32.79	65.49	6.40	-5.45	15.36
16	-83.87	61.72	42.48	29.29	-4.54	4.92
17	-34.88	45.64	21.02	24.26	-5.46	-3.92
18	-100.17	81.41	17.08	40.25	10.75	3.08
19	-16.95	-2.45	14.38	38.15	0.23	4.98
20	-25.50	-7.46	54.48	10.66	2.64	1.40
21	-61.42	79.35	-0.23	15.48	-5.17	0.14
22	-30.49	6.14	5.12	39.08	-1.80	1.85
23	-73.62	88.93	4.53	-7.15	-1.64	-6.07
24	-23.83	-4.17	6.22	7.54	-5.24	6.30

Табела 9.15 Оптимално решение за напоните на јазлите  $U_{NB}(pu)$  на SHTWS за модифициран IEEE 30 bus system

$NB/j$	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.0847	1.0939	1.0655	1.0814	1.0746	1.0517	1.0887	1.0496
2	1.0812	1.0799	1.0699	1.0699	1.0634	1.0667	1.0799	1.0607
3	1.0758	1.0798	1.0703	1.0635	1.0561	1.0540	1.0723	1.0573
4	1.0728	1.0755	1.0706	1.0586	1.0512	1.0540	1.0676	1.0582



5	1.0675	1.0663	1.0724	1.0800	1.0599	1.0733	1.0711	1.0830
6	1.0680	1.0707	1.0743	1.0577	1.0509	1.0540	1.0640	1.0591
7	1.0641	1.0643	1.0680	1.0601	1.0472	1.0549	1.0608	1.0638
8	1.0597	1.0647	1.0807	1.0553	1.0532	1.0496	1.0585	1.0521
9	1.0697	1.0794	1.0842	1.0646	1.0542	1.0733	1.0715	1.0828
10	1.0787	1.0886	1.0828	1.0624	1.0500	1.0716	1.0765	1.0884
11	1.0591	1.0740	1.1000	1.0795	1.0699	1.1000	1.0739	1.0992
12	1.0712	1.0852	1.0742	1.0470	1.0372	1.0713	1.0631	1.0745
13	1.0755	1.1000	1.0847	1.0497	1.0424	1.1000	1.0687	1.0899
14	1.0650	1.0772	1.0654	1.0366	1.0254	1.0589	1.0539	1.0664
15	1.0643	1.0757	1.0642	1.0355	1.0237	1.0560	1.0530	1.0652
16	1.0699	1.0814	1.0716	1.0461	1.0348	1.0643	1.0622	1.0747
17	1.0732	1.0831	1.0755	1.0528	1.0404	1.0646	1.0679	1.0806
18	1.0625	1.0722	1.0613	1.0336	1.0207	1.0501	1.0509	1.0646
19	1.0632	1.0722	1.0620	1.0354	1.0221	1.0496	1.0524	1.0665
20	1.0667	1.0758	1.0666	1.0414	1.0283	1.0543	1.0578	1.0714
21	1.0721	1.0809	1.0737	1.0503	1.0368	1.0598	1.0661	1.0780
22	1.0725	1.0814	1.0742	1.0506	1.0371	1.0603	1.0665	1.0779
23	1.0633	1.0731	1.0625	1.0327	1.0191	1.0493	1.0512	1.0615
24	1.0668	1.0752	1.0668	1.0369	1.0216	1.0483	1.0561	1.0628
25	1.0583	1.0647	1.0602	1.0321	1.0190	1.0378	1.0474	1.0513
26	1.0485	1.0531	1.0465	1.0157	1.0014	1.0212	1.0325	1.0385
27	1.0581	1.0638	1.0627	1.0372	1.0261	1.0393	1.0492	1.0504
28	1.0657	1.0688	1.0742	1.0543	1.0479	1.0509	1.0610	1.0567
29	1.0471	1.0509	1.0475	1.0188	1.0063	1.0207	1.0326	1.0361
30	1.0407	1.0434	1.0386	1.0082	0.9949	1.0099	1.0230	1.0278
<i>NB/j</i>	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1.0955	1.0582	1.0750	1.0552	1.0712	1.0632	1.0563	1.0618
2	1.0768	1.0620	1.0757	1.0802	1.0789	1.0671	1.0737	1.0835
3	1.0759	1.0674	1.0763	1.0659	1.0711	1.0663	1.0640	1.0686
4	1.0704	1.0686	1.0756	1.0673	1.0700	1.0660	1.0648	1.0693
5	1.0594	1.0794	1.0688	1.0755	1.0538	1.0480	1.1000	1.0836
6	1.0651	1.0720	1.0764	1.0671	1.0662	1.0673	1.0651	1.0711
7	1.0582	1.0714	1.0701	1.0669	1.0572	1.0549	1.0745	1.0707
8	1.0566	1.0732	1.0748	1.0628	1.0607	1.0689	1.0594	1.0727
9	1.0826	1.0813	1.0895	1.0701	1.0748	1.0854	1.0665	1.0670
10	1.0845	1.0951	1.1000	1.0719	1.0895	1.0932	1.0747	1.0715
11	1.1000	1.0673	1.0856	1.0724	1.0581	1.0915	1.0554	1.0577
12	1.0684	1.0732	1.0695	1.0673	1.0849	1.0672	1.0758	1.0637
13	1.0705	1.0720	1.0563	1.0734	1.1000	1.0635	1.0952	1.0698
14	1.0618	1.0692	1.0672	1.0611	1.0781	1.0625	1.0666	1.0547
15	1.0617	1.0703	1.0694	1.0600	1.0767	1.0636	1.0643	1.0534
16	1.0702	1.0782	1.0784	1.0648	1.0822	1.0732	1.0698	1.0606
17	1.0768	1.0872	1.0909	1.0670	1.0845	1.0840	1.0697	1.0642
18	1.0618	1.0724	1.0741	1.0575	1.0742	1.0664	1.0593	1.0500
19	1.0639	1.0754	1.0785	1.0578	1.0746	1.0700	1.0586	1.0505
20	1.0685	1.0799	1.0834	1.0609	1.0779	1.0753	1.0621	1.0551
21	1.0759	1.0883	1.0934	1.0656	1.0823	1.0849	1.0664	1.0623
22	1.0761	1.0886	1.0934	1.0660	1.0826	1.0851	1.0669	1.0629

23	1.0610	1.0731	1.0743	1.0586	1.0739	1.0662	1.0599	1.0516
24	1.0657	1.0814	1.0851	1.0614	1.0751	1.0750	1.0600	1.0562
25	1.0562	1.0713	1.0757	1.0562	1.0642	1.0644	1.0523	1.0515
26	1.0448	1.0619	1.0671	1.0467	1.0542	1.0535	1.0398	1.0376
27	1.0560	1.0697	1.0740	1.0576	1.0623	1.0633	1.0536	1.0555
28	1.0625	1.0723	1.0762	1.0655	1.0649	1.0673	1.0626	1.0695
29	1.0432	1.0592	1.0645	1.0471	1.0511	1.0511	1.0397	1.0399
30	1.0358	1.0531	1.0590	1.0410	1.0447	1.0440	1.0316	1.0309
<i>NB/j</i>	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1.0988	1.0432	1.0844	1.0722	1.0817	1.0743	1.0738	1.0746
2	1.0984	1.0722	1.0745	1.0675	1.1000	1.0760	1.1000	1.0746
3	1.0834	1.0574	1.0760	1.0654	1.0800	1.0761	1.0793	1.0797
4	1.0789	1.0599	1.0731	1.0629	1.0786	1.0756	1.0796	1.0799
5	1.0714	1.0524	1.0543	1.0825	1.0624	1.0571	1.0725	1.0632
6	1.0762	1.0640	1.0728	1.0623	1.0759	1.0772	1.0771	1.0794
7	1.0682	1.0531	1.0594	1.0652	1.0654	1.0648	1.0717	1.0702
8	1.0749	1.0689	1.0766	1.0573	1.0736	1.0838	1.0699	1.0781
9	1.0751	1.0799	1.0835	1.0732	1.0735	1.0788	1.0820	1.0895
10	1.0821	1.0796	1.0908	1.0783	1.0798	1.0833	1.0882	1.1027
11	1.0641	1.0999	1.0836	1.0779	1.0631	1.0750	1.0783	1.0785
12	1.0617	1.0586	1.0751	1.0606	1.0681	1.0727	1.0687	1.0922
13	1.0562	1.0625	1.0811	1.0619	1.0679	1.0748	1.0601	1.1000
14	1.0534	1.0502	1.0667	1.0530	1.0607	1.0664	1.0642	1.0883
15	1.0533	1.0501	1.0659	1.0526	1.0600	1.0660	1.0646	1.0884
16	1.0637	1.0611	1.0753	1.0618	1.0675	1.0722	1.0724	1.0933
17	1.0723	1.0698	1.0821	1.0695	1.0726	1.0768	1.0807	1.0976
18	1.0532	1.0504	1.0649	1.0522	1.0585	1.0646	1.0662	1.0882
19	1.0558	1.0532	1.0669	1.0545	1.0598	1.0656	1.0689	1.0894
20	1.0617	1.0592	1.0722	1.0598	1.0642	1.0696	1.0733	1.0924
21	1.0714	1.0685	1.0805	1.0687	1.0713	1.0763	1.0808	1.0978
22	1.0718	1.0686	1.0808	1.0690	1.0717	1.0768	1.0809	1.0982
23	1.0532	1.0490	1.0645	1.0524	1.0591	1.0662	1.0656	1.0895
24	1.0602	1.0547	1.0694	1.0589	1.0637	1.0718	1.0717	1.0947
25	1.0551	1.0478	1.0605	1.0494	1.0588	1.0665	1.0656	1.0831
26	1.0404	1.0333	1.0464	1.0359	1.0467	1.0557	1.0561	1.0755
27	1.0592	1.0507	1.0618	1.0502	1.0618	1.0685	1.0665	1.0797
28	1.0737	1.0632	1.0722	1.0598	1.0739	1.0778	1.0749	1.0798
29	1.0427	1.0344	1.0461	1.0350	1.0483	1.0565	1.0560	1.0713
30	1.0332	1.0250	1.0370	1.0263	1.0405	1.0496	1.0499	1.0664

Табела 9.16 Оптимално решение за фазните агли на јазлите  $\theta_{NB}(\circ)$  на SHTWS за модифициран IEEE 30 bus system

<i>NB/j</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	-0.953	-1.702	-2.665	-3.069	-3.319	-3.663	-2.479	-2.608
3	-1.275	-2.720	-4.008	-4.549	-4.911	-5.137	-3.653	-3.671
4	-1.529	-3.311	-4.897	-5.567	-6.013	-6.284	-4.460	-4.482
5	-3.590	-5.746	-7.951	-9.449	-9.970	-9.668	-7.578	-7.743
6	-1.854	-3.948	-5.869	-6.679	-7.219	-7.379	-5.341	-5.315

7	-2.850	-5.020	-7.106	-8.260	-8.832	-8.773	-6.671	-6.664
8	-1.906	-4.113	-6.299	-7.004	-7.668	-7.760	-5.635	-5.486
9	-0.789	-4.286	-6.626	-8.043	-8.560	-8.618	-5.898	-5.893
10	-2.250	-5.647	-8.133	-9.814	-10.511	-10.470	-7.666	-7.372
11	2.368	-2.709	-5.283	-6.908	-7.128	-7.259	-4.045	-4.543
12	-1.518	-4.875	-7.095	-8.516	-9.220	-9.686	-6.613	-6.333
13	0.326	-3.617	-5.785	-7.121	-7.737	-8.646	-5.126	-5.027
14	-2.078	-5.502	-7.847	-9.423	-10.189	-10.533	-7.423	-7.027
15	-2.234	-5.648	-8.038	-9.643	-10.402	-10.669	-7.624	-7.197
16	-2.007	-5.397	-7.778	-9.375	-10.092	-10.285	-7.333	-7.011
17	-2.284	-5.700	-8.174	-9.859	-10.580	-10.603	-7.725	-7.395
18	-2.624	-6.093	-8.601	-10.354	-11.147	-11.239	-8.219	-7.750
19	-2.749	-6.234	-8.789	-10.595	-11.393	-11.401	-8.411	-7.942
20	-2.658	-6.125	-8.671	-10.456	-11.232	-11.222	-8.275	-7.843
21	-2.567	-5.982	-8.513	-10.242	-10.972	-10.921	-8.083	-7.698
22	-2.584	-5.991	-8.518	-10.236	-10.965	-10.923	-8.089	-7.694
23	-2.695	-6.094	-8.571	-10.218	-10.983	-11.143	-8.180	-7.642
24	-3.116	-6.466	-9.014	-10.656	-11.402	-11.456	-8.628	-7.988
25	-3.428	-6.441	-8.988	-10.593	-11.416	-11.322	-8.637	-8.009
26	-3.653	-6.704	-9.299	-10.977	-11.834	-11.708	-8.979	-8.303
27	-3.490	-6.270	-8.784	-10.317	-11.164	-11.006	-8.436	-7.850
28	-2.042	-4.235	-6.255	-7.107	-7.693	-7.829	-5.720	-5.622
29	-4.157	-7.051	-9.700	-11.443	-12.387	-12.149	-9.448	-8.722
30	-4.630	-7.606	-10.353	-12.249	-13.264	-12.967	-10.170	-9.343
NB/j	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	-1.418	-1.195	-1.121	-1.737	-1.995	-1.774	-2.764	-2.931
3	-2.283	-2.092	-1.603	-2.100	-2.592	-2.668	-3.658	-3.806
4	-2.769	-2.545	-1.941	-2.556	-3.158	-3.251	-4.467	-4.647
5	-4.831	-4.278	-3.690	-4.354	-4.968	-4.971	-7.720	-7.909
6	-3.314	-3.075	-2.346	-2.994	-3.711	-3.907	-5.265	-5.508
7	-4.269	-3.838	-3.153	-3.822	-4.528	-4.676	-6.607	-6.875
8	-3.412	-3.268	-2.314	-3.015	-3.823	-4.139	-5.465	-5.733
9	-3.401	-3.209	-2.392	-3.125	-4.094	-4.330	-5.835	-6.219
10	-4.876	-4.402	-3.492	-4.244	-5.219	-5.636	-7.238	-7.775
11	-1.506	-1.730	-0.967	-1.743	-2.947	-2.916	-4.411	-4.711
12	-4.061	-3.459	-2.392	-3.439	-4.350	-4.472	-6.432	-6.686
13	-2.764	-2.247	-1.055	-2.082	-3.085	-3.128	-5.190	-5.192
14	-4.682	-4.003	-2.910	-3.985	-4.914	-5.107	-7.106	-7.466
15	-4.845	-4.198	-3.134	-4.132	-5.061	-5.332	-7.244	-7.664
16	-4.629	-4.062	-3.069	-3.949	-4.893	-5.205	-6.975	-7.396
17	-4.920	-4.391	-3.440	-4.261	-5.229	-5.611	-7.301	-7.815
18	-5.302	-4.638	-3.598	-4.545	-5.502	-5.867	-7.725	-8.251
19	-5.449	-4.797	-3.779	-4.688	-5.657	-6.066	-7.877	-8.448
20	-5.345	-4.732	-3.740	-4.610	-5.582	-5.998	-7.758	-8.327
21	-5.201	-4.677	-3.735	-4.522	-5.495	-5.937	-7.588	-8.167
22	-5.208	-4.684	-3.740	-4.528	-5.497	-5.940	-7.592	-8.172
23	-5.276	-4.653	-3.604	-4.547	-5.474	-5.842	-7.690	-8.220
24	-5.625	-5.070	-4.053	-4.913	-5.831	-6.302	-8.044	-8.684

25	-5.677	-5.058	-4.060	-4.980	-5.814	-6.272	-8.036	-8.683
26	-5.939	-5.271	-4.252	-5.198	-6.042	-6.520	-8.322	-9.003
27	-5.554	-4.927	-3.952	-4.890	-5.671	-6.108	-7.858	-8.485
28	-3.576	-3.321	-2.522	-3.202	-3.953	-4.194	-5.578	-5.855
29	-6.331	-5.560	-4.525	-5.534	-6.349	-6.846	-8.705	-9.427
30	-6.882	-6.007	-4.929	-5.989	-6.829	-7.368	-9.306	-10.098
<i>NB/j</i>	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	-2.809	-3.079	-2.334	-2.333	-1.816	-1.390	-1.558	-1.064
3	-3.885	-4.140	-3.633	-3.371	-2.545	-2.461	-1.631	-1.489
4	-4.747	-5.055	-4.436	-4.113	-3.095	-2.996	-1.976	-1.804
5	-7.887	-7.593	-7.097	-7.561	-5.063	-4.985	-4.069	-3.983
6	-5.690	-5.955	-5.354	-4.981	-3.697	-3.647	-2.367	-2.170
7	-7.002	-7.046	-6.477	-6.412	-4.610	-4.516	-3.340	-3.146
8	-5.997	-6.243	-5.746	-5.217	-3.905	-3.969	-2.293	-2.247
9	-6.626	-6.874	-6.093	-5.398	-3.897	-3.911	-2.082	-1.325
10	-8.299	-8.577	-7.633	-6.940	-5.376	-5.164	-3.264	-2.490
11	-5.212	-5.484	-4.730	-3.960	-2.495	-2.539	-0.285	0.983
12	-7.103	-7.536	-6.315	-5.532	-4.442	-4.212	-2.058	-1.962
13	-5.747	-6.362	-4.703	-3.680	-2.956	-2.846	-0.195	-0.720
14	-7.917	-8.317	-7.109	-6.326	-5.116	-4.827	-2.639	-2.385
15	-8.139	-8.512	-7.338	-6.578	-5.294	-5.010	-2.855	-2.517
16	-7.899	-8.262	-7.139	-6.395	-5.064	-4.817	-2.772	-2.330
17	-8.332	-8.633	-7.630	-6.916	-5.412	-5.174	-3.208	-2.520
18	-8.774	-9.104	-7.985	-7.237	-5.799	-5.484	-3.372	-2.798
19	-8.990	-9.298	-8.219	-7.481	-5.966	-5.649	-3.575	-2.884
20	-8.868	-9.167	-8.120	-7.392	-5.861	-5.565	-3.532	-2.812
21	-8.694	-8.962	-8.005	-7.312	-5.722	-5.476	-3.524	-2.747
22	-8.694	-8.961	-8.004	-7.316	-5.727	-5.483	-3.527	-2.766
23	-8.694	-9.002	-7.918	-7.204	-5.778	-5.494	-3.353	-2.893
24	-9.138	-9.367	-8.417	-7.768	-6.181	-5.926	-3.827	-3.247
25	-9.102	-9.317	-8.434	-7.838	-6.278	-5.978	-4.041	-3.387
26	-9.440	-9.653	-8.754	-8.149	-6.555	-6.222	-4.257	-3.556
27	-8.872	-9.083	-8.252	-7.695	-6.168	-5.863	-4.045	-3.380
28	-6.074	-6.332	-5.733	-5.313	-3.993	-3.944	-2.533	-2.331
29	-9.865	-10.071	-9.199	-8.617	-6.985	-6.581	-4.682	-3.885
30	-10.573	-10.776	-9.873	-9.274	-7.565	-7.090	-5.133	-4.240

Табела 9.17 Оптимално решение за привидната моќност низ преносните водови  $S_{GR,G}$ (MVA) на SHTWS за модифициран IEEE 30 bus system

<i>G/j</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
1	32.838	63.552	87.963	104.768	111.537	122.049	85.707	86.272
2	16.231	34.167	46.774	54.919	58.445	58.089	45.002	41.926
3	8.079	18.064	24.427	27.956	29.787	29.257	23.099	20.163
4	15.027	32.081	44.324	51.616	54.897	55.397	42.161	39.578
5	27.207	40.750	51.990	63.619	64.286	59.117	50.903	52.375
6	12.469	25.095	34.789	39.273	41.839	40.182	32.489	28.627
7	19.299	32.112	46.286	50.520	53.972	49.301	41.591	37.887
8	12.124	11.671	14.078	25.835	20.781	21.290	16.956	24.210

9	23.477	26.024	29.882	36.028	36.258	31.415	30.685	31.370
10	20.609	16.464	25.455	15.642	20.685	19.995	18.937	18.466
11	10.477	5.738	9.235	13.704	12.885	15.848	6.747	13.851
12	2.609	7.418	8.734	11.474	11.770	11.927	9.025	9.785
13	30.655	15.641	15.918	13.463	15.841	19.622	17.957	16.138
14	28.263	27.065	28.122	31.883	34.563	33.864	32.782	28.285
15	0.758	14.112	18.591	24.589	26.461	29.380	18.029	17.172
16	26.745	22.151	20.806	19.260	20.393	27.335	21.545	22.623
17	4.568	5.448	6.259	7.177	7.690	7.562	6.583	5.796
18	11.001	12.895	14.842	16.814	17.881	17.436	15.439	13.678
19	4.491	5.213	6.361	7.472	7.523	6.433	6.462	6.208
20	1.071	1.132	1.337	1.443	1.445	1.358	1.344	1.205
21	3.146	3.087	4.305	5.584	5.203	3.006	4.728	4.836
22	3.257	3.991	4.749	5.517	5.725	5.223	4.804	4.504
23	1.795	1.962	2.616	3.394	3.269	2.195	2.790	2.989
24	5.370	5.817	7.132	8.927	9.206	8.032	8.214	7.384
25	6.735	7.451	9.042	11.182	11.633	10.381	10.292	9.128
26	6.633	6.731	8.780	11.347	11.308	8.736	10.336	9.406
27	11.633	13.145	15.209	18.605	19.907	18.718	16.982	15.996
28	5.714	6.337	7.293	9.036	9.690	9.062	8.242	7.965
29	2.097	2.160	2.355	1.211	1.125	1.810	1.841	0.537
30	4.070	4.182	4.741	4.941	5.139	5.153	4.843	4.272
31	5.786	5.527	5.985	7.767	8.452	7.710	7.221	8.133
32	3.041	2.607	3.302	3.091	2.676	2.033	3.365	2.309
33	2.880	2.999	1.886	1.337	0.699	2.991	2.431	3.222
34	2.476	2.928	3.428	4.009	4.262	4.085	3.688	3.186
35	0.528	1.487	2.056	3.125	3.646	2.617	1.837	1.358
36	7.749	10.650	13.597	16.788	18.174	16.195	14.216	11.422
37	3.706	4.387	5.142	6.025	6.410	6.140	5.536	4.778
38	4.207	4.981	5.840	6.845	7.283	6.976	6.288	5.425
39	2.185	2.583	3.022	3.532	3.753	3.598	3.250	2.810
40	3.306	2.365	3.390	1.063	2.670	0.921	1.488	2.602
41	7.275	9.768	12.510	14.563	15.482	14.973	13.100	10.490
<i>G/j</i>	9	10	11	12	13	14	15	16
1	59.188	39.297	37.356	72.822	68.029	58.440	96.048	105.428
2	30.366	24.860	18.926	25.085	30.298	30.928	42.304	44.345
3	15.379	15.169	9.054	11.812	13.878	16.059	19.389	20.867
4	28.581	22.679	17.124	22.878	28.363	28.795	39.974	41.867
5	34.827	31.859	25.624	26.201	32.139	32.467	52.664	50.026
6	21.640	21.011	13.346	15.682	20.067	22.846	27.456	29.185
7	28.414	25.992	19.118	20.255	27.351	30.439	36.645	40.232
8	8.878	9.946	8.669	11.298	7.430	7.434	29.159	20.304
9	23.451	17.759	20.407	19.065	21.784	23.308	33.378	31.722
10	21.329	9.441	4.053	10.415	14.326	11.311	16.625	11.003
11	9.338	5.131	7.060	2.038	5.910	10.545	5.611	7.318
12	7.073	6.940	6.556	4.739	7.433	8.456	7.597	8.427
13	21.197	16.129	14.315	13.376	14.004	14.457	14.662	15.117
14	27.565	26.430	23.468	20.466	25.634	25.886	26.842	28.604
15	10.857	7.962	4.685	7.359	12.229	10.185	17.272	17.195

16	18.588	17.412	21.466	19.976	22.371	19.259	23.843	21.758
17	4.996	4.138	3.744	4.473	4.826	4.777	5.922	6.371
18	11.714	10.373	10.135	10.785	11.657	11.960	14.024	15.137
19	5.220	6.050	7.577	4.764	5.227	7.279	5.792	6.535
20	1.078	1.361	1.689	1.039	1.120	1.550	1.234	1.372
21	4.436	5.702	7.489	3.159	3.501	6.862	3.113	4.341
22	3.689	3.745	4.361	3.500	3.815	4.525	4.457	4.883
23	2.545	3.138	4.144	1.935	2.186	3.847	2.129	2.657
24	7.054	6.606	7.153	4.749	5.064	7.696	5.731	7.086
25	8.641	7.873	8.263	6.048	6.436	9.156	7.477	9.023
26	9.267	9.563	11.094	5.771	6.104	11.202	6.165	8.670
27	13.879	11.361	10.766	10.539	11.729	13.325	13.822	15.201
28	6.839	5.565	5.330	5.052	5.694	6.556	6.629	7.257
29	0.828	1.197	0.539	1.884	1.111	0.634	2.101	2.619
30	3.777	4.261	4.796	3.669	3.925	4.646	4.427	4.838
31	6.575	5.247	5.281	4.258	4.969	6.220	5.439	5.820
32	2.825	4.112	4.955	2.586	2.436	4.395	2.308	3.393
33	2.667	2.864	2.691	1.508	3.099	2.987	2.153	1.295
34	2.868	2.400	2.190	2.386	2.536	2.762	3.111	3.475
35	1.021	1.336	1.186	0.989	1.467	1.477	1.573	2.404
36	10.292	8.425	7.554	8.960	8.884	9.967	11.935	14.156
37	4.297	3.591	3.275	3.570	3.796	4.137	4.663	5.212
38	4.879	4.077	3.717	4.053	4.309	4.697	5.295	5.920
39	2.530	2.118	1.933	2.105	2.238	2.437	2.743	3.062
40	3.359	0.707	2.123	2.204	2.452	0.983	1.949	2.009
41	9.484	7.961	5.730	7.180	8.046	9.177	10.843	11.501
<i>G/j</i>	17	18	19	20	21	22	23	24
1	97.607	112.800	80.626	77.490	70.940	46.389	71.636	35.374
2	48.470	47.643	43.684	39.591	30.339	29.044	19.622	17.934
3	25.034	22.734	23.161	19.503	19.495	17.751	13.156	8.789
4	45.569	45.140	41.079	37.152	28.156	26.956	17.490	15.993
5	53.795	45.223	47.825	52.685	38.795	36.699	29.672	29.334
6	34.904	31.328	32.765	28.452	25.550	24.622	16.329	12.415
7	44.907	42.461	42.846	39.740	29.146	30.866	19.505	17.334
8	14.446	8.513	10.620	24.008	7.650	9.843	11.738	14.668
9	32.235	28.218	30.909	33.012	24.927	25.571	23.765	25.673
10	14.548	17.770	20.392	16.208	11.109	22.172	18.288	4.900
11	9.315	12.431	9.329	7.061	2.335	2.762	3.852	10.129
12	9.941	10.314	9.445	8.000	6.379	5.876	4.081	4.917
13	14.772	17.539	13.425	14.204	14.518	13.511	17.727	23.589
14	31.759	31.492	29.886	28.831	27.977	23.692	22.970	25.939
15	21.357	20.384	15.903	11.763	12.351	10.357	4.991	5.825
16	19.448	16.743	23.886	26.033	21.129	19.714	27.212	19.647
17	6.428	6.208	6.452	6.165	5.474	4.942	4.411	3.451
18	15.169	14.377	15.573	15.138	12.971	11.971	11.258	8.383
19	7.204	6.587	7.557	7.736	5.638	5.527	6.746	3.527
20	1.444	1.256	1.550	1.641	1.196	1.226	1.442	0.917
21	6.036	5.673	5.951	6.325	4.212	4.182	6.022	2.960
22	5.053	4.691	5.291	5.237	4.116	3.914	4.273	2.389

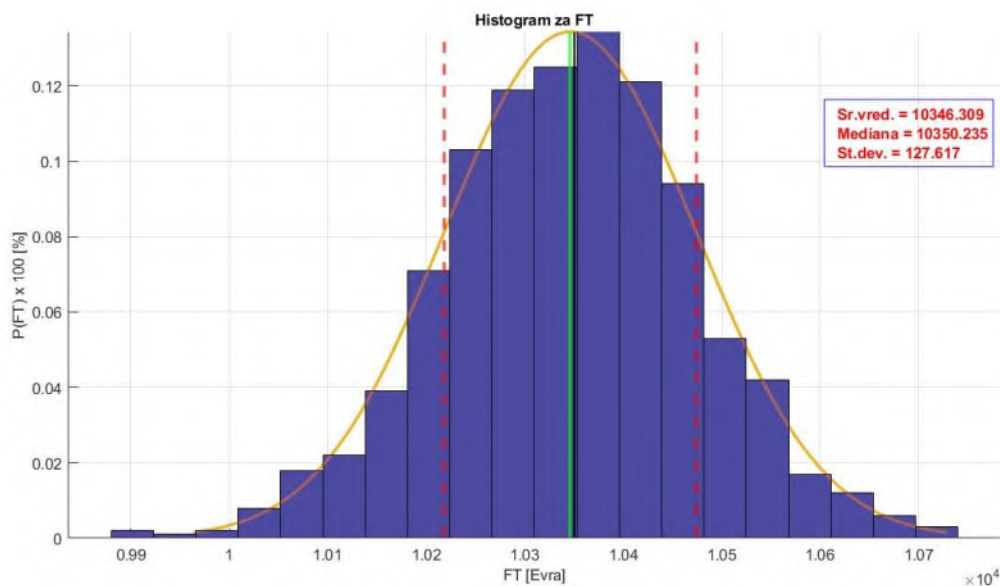
23	3.477	3.299	3.522	3.657	2.469	2.408	3.450	1.544
24	8.848	8.933	7.975	7.783	6.795	5.923	6.267	4.726
25	10.904	10.966	9.898	9.594	8.481	7.397	7.480	5.789
26	11.808	11.809	10.510	10.581	8.660	7.725	9.110	6.231
27	17.075	17.362	16.471	15.592	13.940	11.989	11.656	9.232
28	8.291	8.531	8.013	7.574	6.749	5.749	5.745	4.572
29	1.350	0.527	1.162	1.426	1.714	2.223	0.396	2.201
30	4.768	4.218	5.150	5.374	4.230	4.262	4.406	3.500
31	7.168	7.967	7.015	6.617	5.868	4.900	5.504	5.098
32	3.809	3.065	3.739	4.301	3.116	3.490	3.824	3.098
33	1.425	1.917	2.522	2.667	1.455	1.525	2.060	3.427
34	3.687	3.612	3.534	3.369	3.050	2.717	2.401	1.950
35	2.646	2.304	1.636	1.218	1.623	1.330	0.438	1.568
36	15.143	14.492	13.434	12.416	11.844	10.435	8.262	5.567
37	5.534	5.421	5.303	5.053	4.570	4.068	3.592	2.914
38	6.285	6.157	6.023	5.738	5.189	4.618	4.077	3.307
39	3.249	3.183	3.115	2.969	2.689	2.397	2.118	1.721
40	0.959	3.028	2.265	1.568	0.864	3.115	3.451	1.208
41	13.180	12.029	12.295	11.314	10.201	9.709	6.655	5.306

Во табелата 9.18 е прикажана компаративната анализа на вкупните трошоци за работа на оптимизационите проблеми SHTS и SHTWS (моделирани со AC модел), решени со примена на предложениот NSAGA.

Табела 9.18 Споредба на вкупните трошоци за работа на оптимизационите проблеми SHTS и SHTWS (моделирани со AC модел)

	SHTS	SHTWS	Разлика SHTWS-SHTS (%)
$FT_{best}$ (€)	<b>10991.02</b>	<b>10486.89</b>	<b>-4.81</b>
$FT_{mean}$ (€)	<b>10998.50</b>	<b>10501.33</b>	<b>-4.73</b>
$FT_{worst}$ (€)	<b>11013.48</b>	<b>10512.24</b>	<b>-4.77</b>
Ст.дев. (€)	<b>21.88</b>	<b>21.94</b>	<b>0.27</b>
$CPU_{time}$ (s)	<b>74.12</b>	<b>75.68</b>	<b>2.06</b>
Број на управувачки променливи	<b>312</b>	<b>312</b>	<b>0</b>
Број на ограничувања	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>0</b>
Успешност (%)	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>0</b>

Варијацијата на вкупните трошоци за работа на оптимизациониот проблем SHTWS, од 1.000 сценарија симулирани со методата Монте Карло, е прикажана на хистограмот на сликата 9.6. Од друга страна, интервалите што ја дефинираат веројатноста за појава на одреден износ на вкупните трошоци за работа, се прикажани во табелата 9.19.



Слика 9.6 Хистограм со распределба на веројатноста за вкупните трошоци за работа на оптимизациониот проблем SHTWS

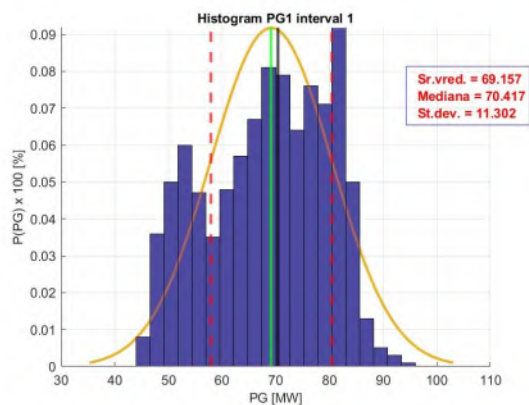
Табела 9.19 Интервали на веројатност на вкупните трошоци за работа за оптимизациониот проблем SHTWS

Интервал	Долна граница (€)	Горна граница (€)	Веројатност (%)
1	9880	9923	0.2
2	9923	9966	0.1
3	9966	10009	0.2
4	10009	10052	0.8
5	10052	10095	1.8
6	10095	10138	2.2
7	10138	10181	3.9
8	10181	10224	7.1
9	10224	10267	10.3
10	10267	10310	11.9
11	10310	10353	12.5
12	10353	10396	14.2
13	10396	10439	12.1
14	10439	10482	9.4
15	10482	10525	5.3
16	10525	10568	4.2
17	10568	10611	1.7
18	10611	10654	1.2
19	10654	10697	0.6
20	10697	10740	0.3

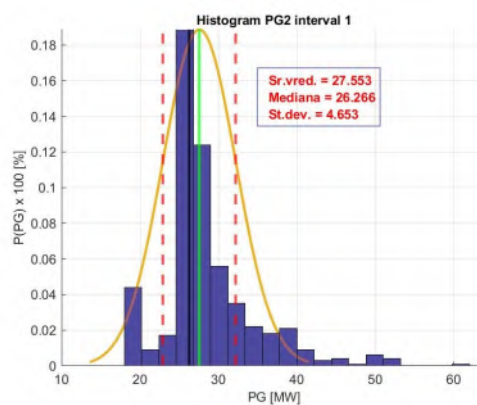
Изработениот алгоритам во програмскиот пакет MATLAB генерира хистограми што ја прикажуваат варијацијата на системските параметри како што се моќноста и напоните на генераторите, како и привидната моќност на преносните водови, што е последица на стохастичноста на ветерната енергија, за целокупниот оптимизационен период од 24 часа. Поради големиот број хистограми, овде како за пример, на сликите



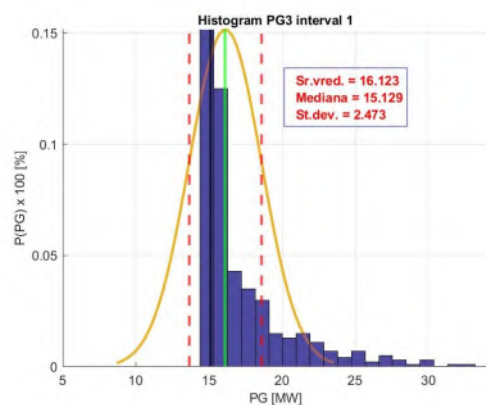
9.7, 9.8 и 9.9 респективно се прикажани хистограмите за веројатноста на појавата на активната моќност и напоните на генераторите, како и на привидната моќност на преносните водови (се избрани случајно 8 од вкупно 41 вод со цел приказ на стохастичноста на овој системски параметар) за првиот интервал, т.е. за  $j = 1$ . Што се однесува до останатите 23 интервали, хистограмите за активната моќност и напоните на генераторите респективно ќе бидат прикажани во Прилог А и Прилог Б.



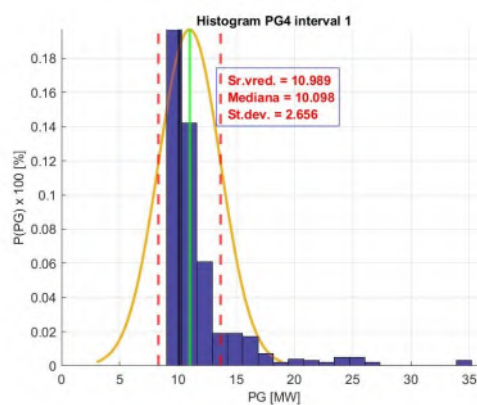
(а)



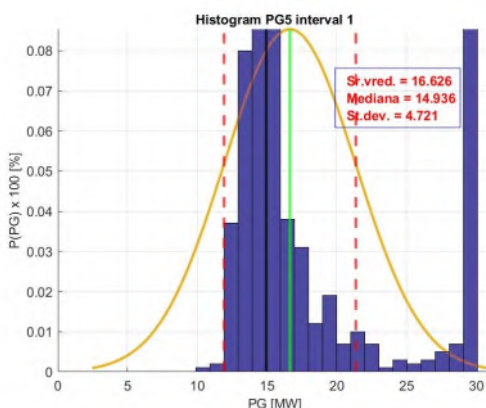
(б)



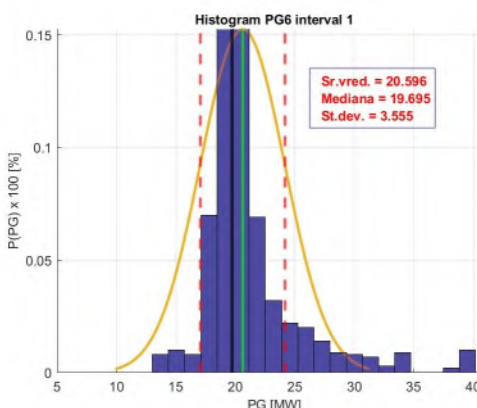
(в)



(г)

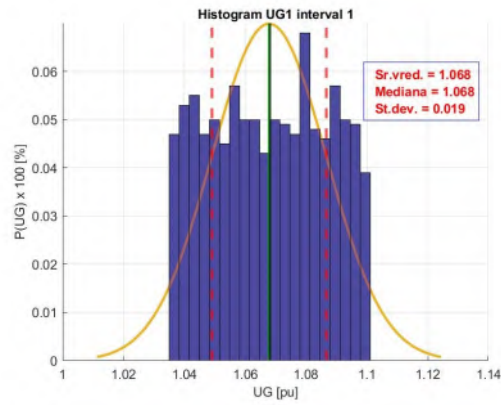


(д)

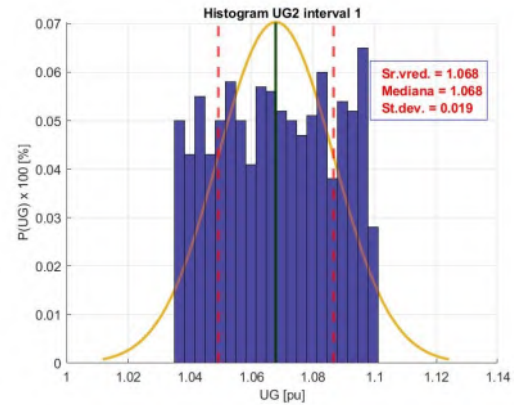


(е)

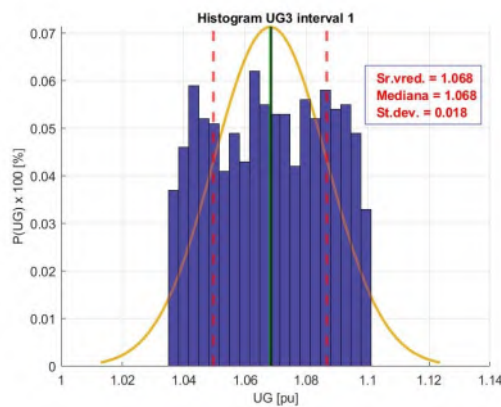
Слика 9.7 Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генераторите за интервал 1



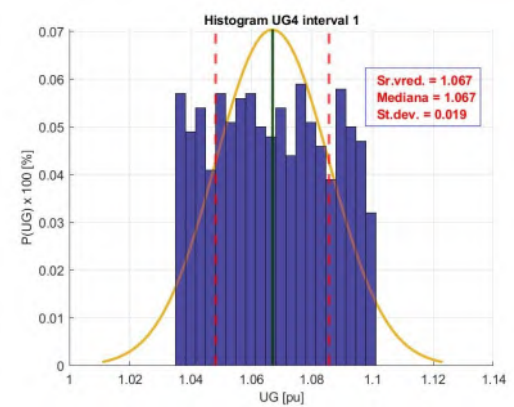
(а)



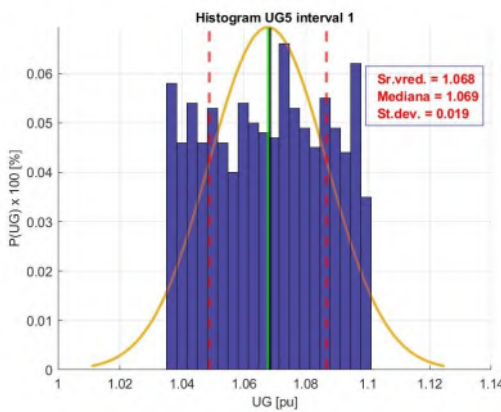
(б)



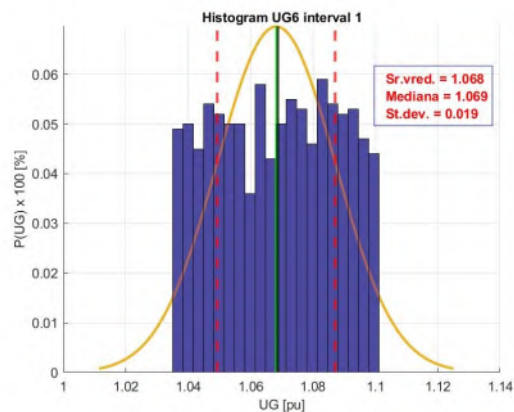
(в)



(г)

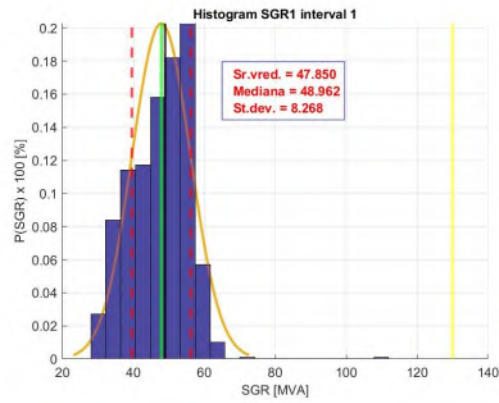


(д)

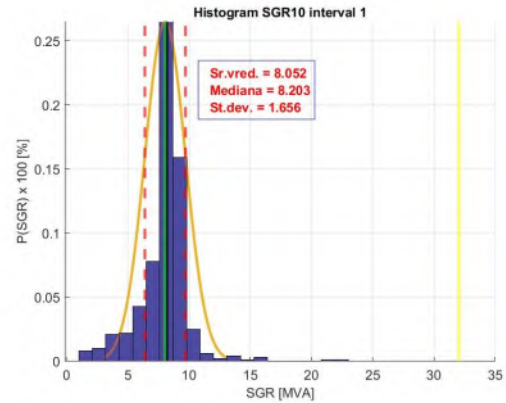


(е)

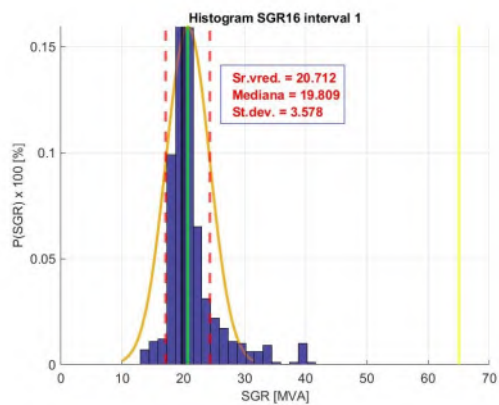
Слика 9.8 Хистограми со распределба на веројатноста за напоните на генераторите за интервал 1



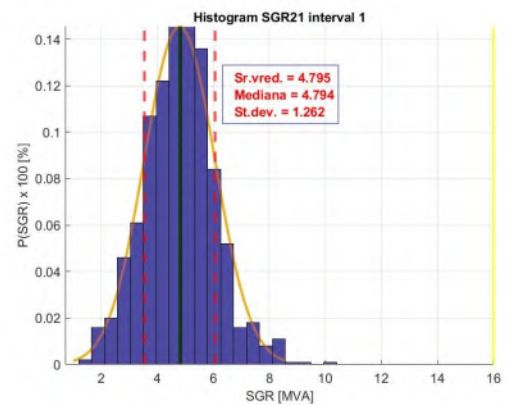
(а)



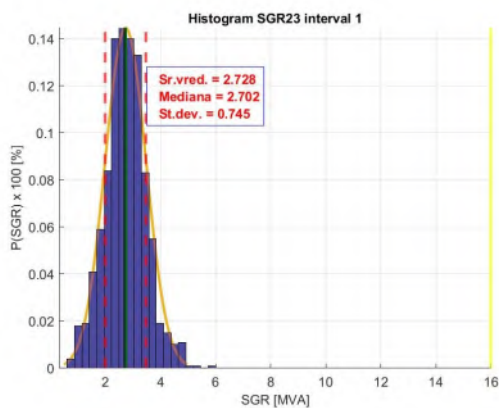
(б)



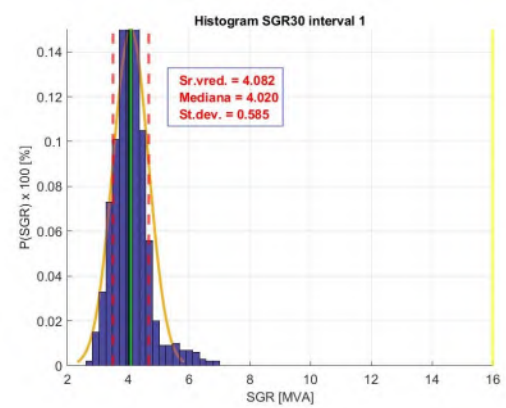
(в)



(г)



(д)



(е)

Слика 9.9 Хистограми со распределба на веројатноста за привидната моќност на преносните водови (по случаен избор) за интервал 1

# **АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ**

---

**Поглавје**

**10**

## 10 АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

### 10.1 КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ СО РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ДРУГИТЕ МЕТАХЕУРИСТИЧКИ АЛГОРИТМИ

Тестирањето на бинарниот NSAGA за решавање на потпроблемот UC, е извршено на тест системот 1. За тест систем 1 е избран стандардниот IEEE тест систем со 6 генератори (од IEEE30 bus system). За да може да се изврши споредба на резултатите со резултатите добиени од литературата, во овој тест систем не се зема предвид valve point ефектот, односно се решава квадратна критериумска функција. Минималните, просечните и максималните трошоци за работа на генераторите, добиени со новопредложениот бинарен NSAGA се прикажани во табела 8.16, каде што се споредуваат со резултатите од претходно предложените метахевристички алгоритми DA-PSO [145], PSO-GWO [146] и AGA [69]. Минималната вредност на вкупните трошоци за гориво изнесува 12827.48 €, што претставува подобрување за 2.53 % споредбено со вредноста добиена од претходно предложениот AGA [69] којашто изнесува 13152.27 €. Средната и максималната вредност на вкупните трошоци за гориво изнесуваат 12845.57 €, односно 12863.65 €, што подразбира подобрување за 2.59 % и 2.63 % ретроспективно, споредбено со вредностите добиени од претходно предложениот AGA [69] кои изнесуваат 13177.78 € и 13201.51 €. Споредбата на резултатите во табелата 8.16 укажува на фактот дека со новопредложениот бинарен NSAGA се добиваат многу подобри вкупни трошоци за работа, споредбено со DA-PSO [145] и PSO-GWO [146]. Освен тоа, компаративната анализа укажува на фактот дека новопредложениот бинарен NSAGA е подобар и од AGA [69], кој бил претходно предложен од страна на авторот. Според тоа, може да се констатира дека новопредложениот бинарен NSAGA претставува ефикасен метахевристички алгоритам за решавање на потпроблемот UC.

Во претходниот параграф новопредложениот бинарен NSAGA беше претставен како погоден метахевристички алгоритам за решавање на оптимизациониот потпроблем UC, во споредба со другите метахевристички методи. Во овој параграф ќе се елаборира анализата на перформансите на новопредложениот реален NSAGA и останатите метахевристички алгоритми, кои биле претходно предложени за конкретниот оптимизационен проблем. Новопредложениот реален NSAGA е применет за решавање на оптимизациониот проблем SHTS со DC моделот, притоа уважувајќи го valve point ефектот, односно се решава неконвексна критериумска функција. За тест систем 2 се зема систем со 4 генератори, односно 2 термоелектрани и 2 хидроелектрани, како и со оптимизационен период кој е поделен на три временски интервали. Тест системот 2 е наменет за тестирање на новопредложениот реален NSAGA, како би ја истакнал својата супериорност споредбено со претходно предложените метахевристички алгоритми. Табелата 8.22 претставува статистичка анализа за вредноста на критериумската функција во текот на 30 последователни независни симулации, за решавање на тест системот 2. Анализата на вредноста на критериумската функција е прикажана во табелата 8.22, како би се прикажале нејзините различни статистички вредности, притоа вклучувајќи ја минималната, средната и максималната вредност, како и времето на пресметка. Табелата 8.22 истакнува дека минималната вредност на вкупните трошоци за гориво изнесува 44601.35 €, што претставува подобрување за 29.23 % споредбено со вредноста добиена од претходно предложениот SAGA [69] која изнесува 57640.00 €. Од друга страна, времето на пресметка од 4.89 s, бележи подобрување за 10.43 % споредбено со времето на пресметка на SAGA [69], кое изнесува 5.40 s. Од Табелата 8.22 не е тешко да се воочи дека новопредложениот реален NSAGA ги надминува

перформансите на другите метахевристички методи, како што се EP [147], DE [147] и AIS [147], во решавањето на оптимизациониот проблем SHTS со DC моделот, без никакво нарушување на ограничувањата.

Во овој параграф ќе се посвети внимание на тест системот 3, преку кој ќе се анализираат перформансите на новопредложениот реален NSAGA споредбено со перформансите на останатите претходно предложени метахевристички алгоритми, за решавање на истиот оптимизационен проблем т.е. SHTS со DC модел, со неконвексна критериумска функција. Тест системот 3 е нешто посложен систем споредбено со тест системот 2, а е составен од 6 генератори, односно 4 термоелектрани и 2 хидроелектрани, односно со оптимизационен период кој е поделен на четири временски интервали. Со тест системот 3 се врши тестирање на новопредложениот реален NSAGA, со цел потврдување на своите подобри перформанси споредбено со претходно предложените метахевристички алгоритми. Во табелата 8.28 е прикажана статистичка анализа за критериумската функција, за извршени 30 последователни независни симулации, за решавање на тест системот 3. Во табелата 8.28 е прикажана анализата на вредноста на критериумската функција, односно нејзините статистички параметри, т.е. минималната, средната и максималната вредност, како и потребното време за решавање на наведениот проблем. Од табелата 8.28 може да се воочи дека минималната вредност на вкупните трошоци за гориво изнесува 85039.00 €, што претставува подобрување за 10.48 % споредбено со вредноста добиена од претходно предложениот AIS [147] којашто изнесува 93950.00 €. Од друга страна, времето на пресметка од 37.95 s, бележи подобрување за 55.84 % споредбено со времето на пресметка на AIS [147], кое изнесува 59.14 s. Од табелата 8.28 не е тешко да се воочи дека новопредложениот реален NSAGA се карактеризира со подобри перформанси и во однос на другите метахевристички алгоритми, како што се EP [147], PSO [147] и DE [147], при решавањето на оптимизациониот проблем SHTS моделиран со DC модел, притоа давајќи оптимално решение без никакво нарушување на ограничувањата, во согласност со табелата 8.27. Според досега кажаното во овие два параграфи, може да се констатира дека новопредложениот реален NSAGA претставува ефикасен метахевристички алгоритам за решавање на оптимизациониот проблем SHTS моделиран со DC модел.

Во однос на претходните два параграфи каде што беше извршена анализа на перформансите на новопредложениот реален NSAGA за решавање на оптимизациониот проблем SHTS моделиран со DC модел, овој параграф има за цел анализа и верификација на перформансите на новопредложениот реален NSAGA при решавање на оптимизационен проблем со поголема сложеност и димензионалност, т.е. SHTS моделиран со AC модел. Новопредложениот реален NSAGA за решавање на SHTS моделиран со AC модел, е применет на тест систем 4, односно benchmark верзијата на IEEE 30 bus system, кој се состои од 6 генератори, 30 јазли и 41 вод. Новопредложениот метахевристички оптимизационен метод е применет за решавање на SHTS моделиран со AC модел, кој може да се дефинира и како Hydro-Thermal OPF, со оглед на тоа дека критериумската функција претставува минимизација на вкупните трошоци за гориво во термоелектраните. Табелата 8.37 покажува дека новопредложениот реален NSAGA ги надминува другите метахевристички алгоритми во решавањето на SHTS моделиран со AC модел, односно проблем од типот на OPF во систем со големи размери, притоа без никакво нарушување на ограничувањата. На пример, резултатите укажуваат на тоа дека минималната, средната и максималната вредност на вкупните трошоци за гориво се речиси идентични со претходно предложениот SAGA [72], од страна на авторот. Но, од друга страна, стандардната девијација и времето на пресметка бележат подобрување од 80.009 % и 35.661 % респективно. Минималната, средната и максималната вредност на

вкупните трошоци за гориво, како и останатите статистички параметри, имаат подобри вредности споредбено со сите други метахевристички алгоритми, коишто се претходно предложени во литературата. На пример, минималната вредност на вкупните трошоци за гориво има најниска вредност од 12475.155€, споредбено со SAGA [72], ENCSA [63], MCSA [63] и CCSA [63], кај кои истата респективно има вредност од 12491.603 €, 13655.538 €, 13718.230 € и 13722.208 €. Освен тоа, а во однос на претходно предложениот ENCSA [63], сите статистички параметри т.е. минималната, средната и максималната вредност на вкупните трошоци за гориво, како и стандардната девијација, односно времето на пресметка, бележат подобрување од -9.462 %, -10.192 %, -15.482 %, -443.216 % и -67.905 % респективно.

Според претходно кажаното, може да се констатира дека новопредложениот реален NSAGA нуди поквалитетно решение без нарушување на ограничувањата и при решавање на оптимизационен проблем со поголема сложеност и димензионалност, како што е SHTS моделиран со AC модел. Со други зборови, NSAGA претставува ефикасен метахевристички алгоритам за оптимизација на погонот на ЕЕС составен од класични и обновливи извори на енергија, па тој е применет за решавање на проблемот SHTWS, чијашто анализа на резултатите ќе биде извршена во потпоглавјето 10.3.

Во согласност со целосно извршената анализа во ова потпоглавје, се докажува **Главната хипотеза на оваа докторска дисертација** т.е. новопредложениот NSAGA, што се темели на нови техники и механизми за справување со ограничувањата, дава поквалитетно решение споредбено со останатите алгоритми предложени во научната литература, а од друга страна овозможува решавање на конкретниот оптимизационен проблем (кој сè уште не бил предмет на анализа), со уважување на сите неопходни ограничувања.

## 10.2 КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ ОД DC И AC МОДЕЛОТ

Резултатите од симулациите со приемна на AC и DC моделот на новопредложениот реален NSAGA, се прикажани во табелата 8.53, а во ова потпоглавје ќе биде извршена нивна детална анализа. Алгоритмите се опишани во потпоглавјата 8.5.1 и 8.5.2, нивниот пристап чекор по чекор е прикажан на сликите 7.4 и 7.5, а дефинираните влезни параметри за двата алгоритми се прикажани во табелите 8.44 и 8.49. Статистичката анализа од 30 извршени независни симулации за секој пристап, е прикажана во табелата 8.53. Во редовите ретроспективно се прикажани минималната, средната и максималната вредност на вкупните трошоци за работа, стандардната девијација, времето на пресметка, бројот на управувачки променливи, бројот на уважени ограничувања, како и стапката на успешност. Очигледно е дека ниеден пристап не е во состојба да обезбеди сеопфатно најдобри услови, т.е. подобри услови во поглед на секој статистички параметар.

DC моделот се смета за подобар од аспект на четири статистички параметри, односно минималната, средната и максималната вредност на вкупните трошоци за работа, како и времето на пресметка, каде тие се помали за 8.19 %, 5.11 %, 1.35 % и 5.75 % респективно во однос на AC моделот. Занимлива работа што треба се забележи е споредба на перформансите кај параметрите коишто се од особено поголема важност, т.е. стандардната девијација, бројот на управувачки променливи и бројот на ограничувања. Од оваа гледна точка AC моделот го надминува DC моделот за изразито поголем процент, односно стандардната девијација, бројот на управувачки променливи и бројот на ограничувања бележат подобрување за 995.22 %, 53.85 % и 21.43 %

респективно. Иако нивниот статистички параметар стапка на успешност е речиси идентичен, сепак ниеден алгоритам не може заедно да постигне помали трошоци за работа, помало време на пресметка, помала стандардна девијација, како и помал број управувачки променливи. Меѓутоа, генерално гледано, АС моделот се покажува подобар од DC моделот за големи системи и оптимизациони проблеми со голем број управувачки променливи, каков што е SHTWS, кој е предмет на истражување на оваа докторска дисертација. Факторите што влијаат на перформансите на двата пристапи се природата на критериумската функција, обемот на допустливи и недопустливи региони во пребарувачкиот простор, како и начинот на кој функционираат генетските оператори и стратегиите за справување со ограничувањата. АС моделот користи нешто пософистициран пристап за справување со ограничувањата, т.е. кај него постојат два различни генетски оператори за селекција на двете паралелни популации, како и стохастички пристап за вкрстување, со кои полесно би се одржувал диверзитетот на популацијата. Според тоа, може да се констатира дека ACNSAGA претставува покомпетентна алатка за решавање на оптимизациони проблеми, со поголем број управувачки променливи, па со таа цел беше применет во понатамошното потпоглавје т.е. за успешно решавање на SHTWS, кој претставува случај за анализа на оваа докторска дисертација.

Според сето она што беше претходно елаборирано во ова потпоглавје, се докажува **Помошната хипотеза 2**, т.е. вкупните трошоци за гориво добиени со примена на АС моделот, се разликуваат од добиените со примена на DC моделот, односно тој се карактеризира со физички пореално решение, што претставува оправданост за примена на АС моделот макар и поголемото време на пресметка. Исто така, беше истакнато дека разликата се должи на фактот дека DC моделот содржи одредени апроксимации при пресметката на тековите на моќност.

### 10.3 АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ ОД СЛУЧАЈОТ ЗА АНАЛИЗА

Во ова потпоглавје ќе биде даден осврт на анализата на добиените резултати од случајот за анализа, т.е. решавањето на оптимизациониот проблем SHTWS и приказ на варијациите на системските параметри, како резултат на стохастичноста на ветерната енергија.

Најпрво треба да се појде од детерминистичките т.е. средните вредности за активната и реактивната моќност на ветерната електрана. Со други зборови, да се дискутираат добиените резултати од оптимизациониот проблем SHTWS кој беше решен врз основа на средните вредности за активната и реактивната моќност на ветерната електрана, како и резултатите од оптимизациониот проблем SHTS со АС модел. Доколку се изврши увид во табелата 9.18, може да се воочи дека ветерната електрана, односно ветерната енергија, па макар и како детерминистичка величина, врши редуција на вкупните трошоци за работа во термоелектраните. Со други зборови, минималната, средната и максималната вредност на вкупните трошоци за работа, пред интеграција на обновливи извори во ЕЕС изнесуваат 10991.02 €, 10998.50 € и 11013.48 € респективно. Од друга страна, тие по инсталирањето на ветерната електрана изнесуваат 10486.89 €, 10501.33 € и 10512.24 € респективно, што подразбира дека бележат намалување од 4.81 %, 4.73 % и 4.77 % респективно (притоа алгоритмот ги задржува истите перформанси), што воопшто не претставува мал процент, имајќи го предвид фактот дека современите ЕЕС заземаат сè поголема сложеност, а од друга страна ЕУ директивите налагаат сè поголема застапеност на обновливи извори на енергија во системот. Ваквата констатација не е тешко да се потврди доколку се изврши увид во табелите 8.50, 8.51,



9.12 и 9.13, во кои се прикажани оптималните решенија на оптимизационите проблеми SHTS и SHTWS респективно. Од оптималните решенија може да се заклучи дека интеграцијата на ветерната електрана влијае врз моќноста на генераторите, како и напонските прилики, а со тоа и врз тековите на моќност, па следствено и врз вкупните трошоци за работа во термоелектраните. Од друга страна, а во врска со ветерната електрана, доколку се изврши увид во сликата 9.4, за јазолот 9 во кој е инсталирана ветерната електрана, може да се увиди дека тој е моделиран како негативен PQ јазол. Со други зборови, активната моќност на ветерната електрана во овој интервал има вредност  $P_{GW,1} = -6.930 \text{ MW}$ , со што директно се влијае врз инјектирана моќност во јазелот 9, каде што има позитивен предзнак т.е. изнесува  $P_i = 6.930 \text{ MW}$ , имајќи го предвид фактот дека  $P_g = P_L + P_i$ , односно  $Q_g = Q_L + Q_i$ . Позитивниот предзнак укажува на тоа дека инјектираната активна моќност излегува од јазолот 9, т.е. на индиректен начин негативниот PQ јазол врши улога на PU јазол, онака како што беше предложено моделот на ветерната електрана, при пресметката на тековите на моќност.

За разлика од претходниот параграф каде што беше анализирано влијанието на ветерната енергија од детерминистички аспект, во овој параграф ќе се дискутира за влијанието на стохастичноста на ветерната енергија, врз трошоците за работа на термоелектраните, како и врз системските параметри. Од извршените 1.000 симулации со методата Монте Карло, се добива хистограмот со распределба на веројатноста за појава на вкупните трошоци за работа во термоелектраните, кој е прикажан на сликата 9.6, а во табелата 9.19 се прикажани интервалите на варијација на вкупните трошоци за работа. Како што може да се воочи од хистограмот на слика 9.6, како и од табелата 9.19, вкупните трошоци за работа во термоелектраните коишто можат да се јават, се движат од 9.880 € до 10.740 €. Средната вредност и медијаната се речиси идентични и изнесуваат 10.346.309 €, односно 10.350.235 €. Ова укажува на тоа дека распределбата на веројатност е речиси симетрична, имајќи предвид дека станува збор за нормална т.е. Гаус-овата распределба. Со други зборови, медијаната во овој случај претставува речиси квантил 50, кој ни укажува на фактот дека ако резултатите се подредат од најмали до најголеми, медијаната претставува нивна „средина“ односно 50-ти процент, притоа укажувајќи ни дека 50% од резултатите на сценаријата би биле помали од медијаната т.е. 10350.235 €, а останатите 50 % поголеми од 10350.235 €. Стандардната девијација 127.617 €, што ни укажува на тоа дека сепак постои одредена веројатност за појава на трошоци, кои значително отстапуваат од средната вредност. На пример, веројатноста дека вкупните трошоци за работа во термоелектраните би биле во интервалот од 10525 € и 10568 €, изнесува 4.2 %. Од друга страна интервалите на кои им претстои најголема веројатност за појава се 10.310 – 10.353 €, 10.353 – 10.396 € и 10.396 – 10.439 €, чијашто веројатност за појава изнесува 12.5 %, 14.2 % и 12.1 % респективно.

Понатаму, ако се изврши увид во сликата 9.7, може да се воочи дека и активната моќност на генераторите (како и на реактивната) се карактеризира со одредена веројатност за нејзина појава. Од хистограмите на сликата 9.7 може да се виде дека тие се карактеризираат со нормална, но несиметрична распределба на веројатноста. Освен тоа може да се увиди дека генераторот 1 се карактеризира со најголема стандардна девијација, односно дека постои одредена веројатност за појава на моќност различна од онаа на медијаната. Што се однесува до останатите генератори, кај нив неколку интервали значително доминираат од останатите во поглед на веројатноста. Ваквата појава може да биде последица на тоа дека генераторот 1 е всушност slack генератор.

Од друга страна, ако се направи увид во хистограмите со распределба на веројатноста за појава на напоните на генераторите, може да се констатира речиси

спротивен случај. Може да се каже дека стохастичноста на ветерната енергија т.е. стохастичноста на активната и реактивната моќност, имаат спротивно влијание врз стохастичките текови на моќност, од аспект на напонските прилики во мрежата. Постои одредена вредност на стандардната девијација, којашто укажува на фактот дека постојат голем број вредности кои отстапуваат од средната вредност. Со други зборови, интервалите на веројатност имаат слична вредност на веројатноста за нивна појава. Ова укажува на фактот дека напоните на генераторите, системски параметар се карактеризираат со значително поголема сензитивност на стохастичноста на ветерната енергија, споредбено со моќностите на генераторите.

Кога станува збор за моќностите низ водовите, како важен системски ОРФ параметар, логично е дека и тие како состојбени променливи би подлежеле на стохастичност. На сликата 9.9 се прикажани хистограмите со распределба на веројатноста за појава на привидната моќност на одредени водови, за интервал 1. Од нивните хистограми, може да се дефинира сосем трет случај споредбено со активната моќност и напоните на генераторите. Хистограмите на некои водови се карактеризираат со речиси симетрична распределба, а на некои водови со несиметрична каде одредени интервали на веројатност значително доминираат во однос на останатите интервали. Со други зборови, водовите со хистограм со симетрична распределба и поголема стандардна девијација се посензитивни, додека водовите со хистограм со несиметрична распределба и помала стандардна девијација не се толку сензитивни, на стохастичноста на ветерната енергија, која следствено дава стохастички карактер на тековите на моќност во системот.

Според сето она кое беше претходно елаборирано во последните четири параграфи, се докажува **Помошната хипотеза 1**, т.е. дека стохастичноста на ветерната енергија има влијание врз вкупните трошоци за гориво на термоелектраните, но и врз параметрите на системот. т.е. контролните и состојбените променливи, имајќи ја предвид стохастичноста на тековите на моќност.

# ЗАКЛУЧОК

---

---

Поглавје

11

## 11 ЗАКЛУЧОК

Во ова поглавје се дискутира за општите аспекти на истражувањето, коешто беше предложено и елаборирано во докторската дисертација, во релевантните поглавја за деталните аспекти на извршеното истражување.

Претставеното истражување е потполно компјутерски ориентирано, односно засновано на симулации, а клучната мотивација беше развивање на метахевристички алгоритам за решавање на проблемот SHTWS, односно негово математичко моделирање и решавање со предложениот NSAGA.

SHTWS е витален чекор во оперативното планирање на современите сложени електроенергетски системи, чијашто интеграција на обновливи извори, особено ветерната енергија, зазема сè поголем домен. Практичната и реалната природа на оптимизациониот проблем SHTWS, е нелинеарна и неконвексна. Во современата литература тренд е решавање на проблемот SHTS со конвексна критериумска функција, притоа занемарувајќи го valve point ефектот, ограничувањата за ramp rate, ротирачка резерва, како и ограничувањата што потекнуваат од AC моделот за пресметка на тековите на моќност т.е. ограничувањата за реактивната моќност на генераторите, напоните на генераторите, напоните на јазлите, реактивната моќност на компензаторите, итн. Од друга страна, во литературата претставува тренд и решавање на проблемот SHTWS, преку пресметка на тековите на моќност со DC модел, како и моделирање на ветерната енергија по детерминистички пат, притоа занемарувајќи ја нејзината стохастичност. Ваквите претпоставки резултираат со физички нереално решение, коешто има за последица големи економски загуби во оперативното планирање.

Метахевристичките алгоритми, од кои особено GA, се покажале како успешни во пронаоѓањето оптимално решение на ваквите оптимизациони проблеми, притоа без никакви барања за апроксимација на критериумската функција. Во литературата биле предложени многу MA од своето настанување и применети во различни области на оптимизацијата. Нивните примени биле подеднакво корисни во подрачјето на ED, UC, или SHTS.

GA претставува еден од првите и најприменувани EA, но развиениот алгоритам во оваа дисертација, којшто се базира на GA, во себе содржи современи техники и стратегии за успешно справување со ограничувањата, па како таков претставува една нова генерација на GA. Како и сите други EA, така и предложениот NSAGA започнува со работа преку генерирање почетна популација, па потоа примена на генетските оператори селекција, вкрстување, мутација и елитизам, во комбинација со современи стратегии за одржување на диверзитетот на популацијата, а на крај следствено и избор на најдоброто оптимално решение.

Во согласност со теоремата „No free lunch“, примената на NSAGA се базира на многу ограничено и насочено истражување, но и од друга страна тој не бил претходно истражуван за негова примена во која било област на работата на ЕЕС. GA се покажал како успешен алгоритам во различни примени, што го мотивирало авторот да ги истражи неговите перформанси, односно да предложи соодветни модификации и надоградувања, притоа добивајќи го NSAGA, со цел негова примена на оптимизационите проблеми SHTS и SHTWS.

Како и сите други EA, така и GA пати од проблем на прерана конвергенција и заробување во локални оптимуми. Со цел избегнување на овие проблеми, во оваа докторска дисертација е предложен метод базиран на GA, во кој се интегрирани

најсовремени техники за справување со ограничувањата, како што се адаптивните стратегии за вкрстување и мутација, нов механизам за корекција на бинарните хромозоми, нов механизам за корекција на реалните хромозоми, self-adaptive penalty factor, superiority of feasible solutions (SF), stochastic ranking (SR), stochastic Crossover (SX). Од друга страна, интегрирани се и современи оператори за вкрстување и мутација, односно Laplace crossover (LX), Logistic distribution-based crossover (LogX) и Makinen, Periaux, and Toivanen mutation (MPTM).

Стандардните тест системи се успешно истражени и решени со примена на предложениот NSAGA. Со добивањето на поквалитетно решение и без нарушени ограничувања, се верифицираат ефикасноста и ефективноста на предложениот алгоритам, којшто беше предмет на истражување во оваа докторска дисертација.

Предложеното истражување т.е. предложениот математички модел уважува многу практични ограничувања што истражувачите многу ретко ги земале предвид, или пак воопшто не ги уважувале. Под овие практични ограничувања се подразбираат ограничувањата за ramp rate, ротирачка резерва, АС моделот за пресметка на тековите на моќност т.е. ограничувањата за биланс на моќности во јазлите, реактивната моќност на генераторите, напоните на генераторите, напоните на јазлите, реактивната моќност на компензаторите, привидната моќност низ водовите, стохастичкиот модел на ветерната електрана со методот Монте Карло и нејзиниот модел при пресметката на тековите на моќност итн.

Оптимизационите проблеми SHTS и SHTWS никогаш не биле решени со примена на АС моделот за пресметка на тековите на моќност, притоа уважувајќи ги ограничувањата за ramp rate, ротирачка резерва, реактивната моќност на генераторите, напоните на генераторите, напоните на јазлите, реактивната моќност на компензаторите, привидната моќност низ водовите. Оваа докторска дисертација исто така, успешно ги истражува перформансите на предложениот NSAGA, со оглед на претходно наведените ограничувања, како и перформансите на DC и АС моделот на NSAGA.

Понатаму, SHTWS е исто така истражуван преку математичко моделирање на стохастичноста на ветерната енергија, со методот Монте Карло. Со него се генерирани 1.000 сценарија чијшто решенија всушност претставуваат стохастички OPF, а предложениот SHTWS е успешно применет за решавање на овие сценарија.

Тест системот IEEE 30 bus system што е достапен во литературата, е исто така успешно истражен со користење на NSAGA, со цел увид во перформансите и оправданоста за примена на DC и АС моделот на предложениот алгоритам. Од друга страна, IEEE 30 bus system е модифициран и адаптиран за негово решавање со предложениот NSAGA, со цел увид во резултатите од случајот за анализа.

Во сите случаи, односно за сите тест системи, резултатите од најдобрите вкупни трошоци за работа на термоелектраните (минималната, средната и максималната вредност), заедно со времето на извршување за најмалку 30 независни симулации, се споредени со резултатите од неодамна достапните метахевристички алгоритми во литературата. Во сите случаи, предложениот NSAGA го надминува класичниот GA, претходно предложениот SAGA од страна на авторот, како и неодамна достапните т.е. објавените метахевристички алгоритми во литературата.

Според тоа, може да се заклучи дека предложениот NSAGA може да биде вредна методологија за решавање на оптимизациониот проблем SHTWS, па дури и со уважување на сите практични ограничувања кои беа претходно спомнати. Понатаму

може да се заклучи дека предложениот метод претставува успешна алатка за решавање на поголеми и посложени ЕЕС.

## 11.1 ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА

Некои препораки во врска со идната истражувачка работа може да се сумираат како што е наведено подолу, т.е.:

- подобрување на перформансите на стандардниот NSAGA преку развивање нови оператори и контрола на параметрите на NSAGA,
- истражување за хибридни модели составени од стандардниот NSAGA и останатите МА,
- евалуација на перформансите на сето горенаведено за другите области на оптимизација во електроенергетиката, како што се одредување оптимална локација на кондензаторските батерии во ЕЕС, оптимална работа на микромрежа составена од класични и обновливи извори на енергија, решавање на SHTWS со минимизација на емисијата на штетни гасови или решавање на SHTWS со мултикритериумска оптимизација.
- проширување на оптимизациониот проблем SHTWS, преку уважување на соларната енергија и моделирање на нејзината стохастичност.

## 11.2 ПРАКТИЧНА ПРИМЕНА

Практичната примена на предложеното истражување може да се наведе како:

- подобрување на визуализацијата на предложениот алгоритам, за обезбедување зголемена флексибилност, интерактивност и практичност,
- креирање графички кориснички интерфејс (GUI), кој понатаму може да биде надградуван. Ваквиот GUI може да претставува исклучително важна алатка на системските оператори, во оперативното планирање на ЕЕС составен од хидроелектрани, термоелектрани и ветерни електрани, за ден однапред т.е. day-ahead, којашто би дала реално и физички прифатливо решение, имајќи предвид дека во предложениот алгоритам се уважени сите неопходни ограничувања,
- N-1 испитувања, но истражувања поврзани како со развојот на производните капацитети, така и со развојот на преносната мрежа.

ЕУ директивите за процентуалната застапеност на обновливите извори на енергија во ЕЕС, како и континуираното зголемување на конзумот, придонесуваат за поголема сложеност на современите ЕЕС. Според тоа, може да се констатира дека исклучително нелинеарниот и неконвексниот оптимизационен проблем SHTWS, ќе се решава и применува за континуирано, сигурно и најекономично снабдување со електрична енергија со зголемена економска ефикасност.

# ДОДАТОК

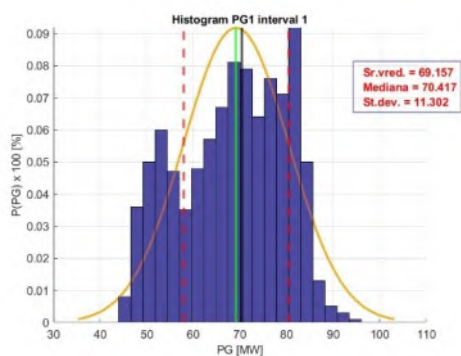
---

---

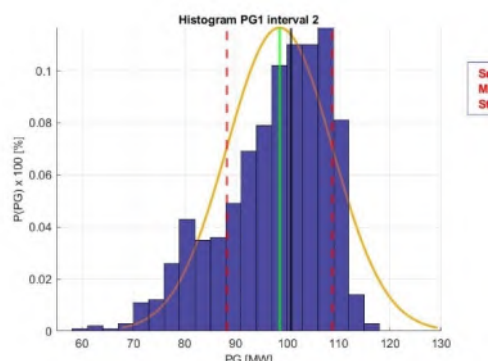
**Додаток**

**A**

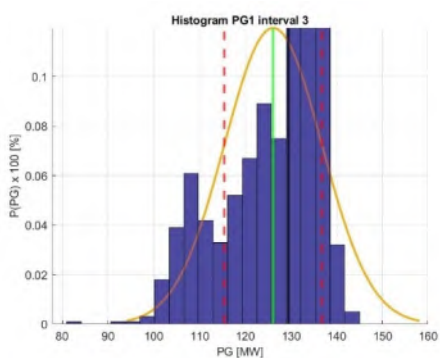
## ДОДАТОК А ХИСТОГРАМИ СО РАСПРЕДЕЛБА НА ВЕРОЈАТНОСТА ЗА АКТИВНАТА МОЌНОСТ НА ГЕНЕРАТОРИТЕ



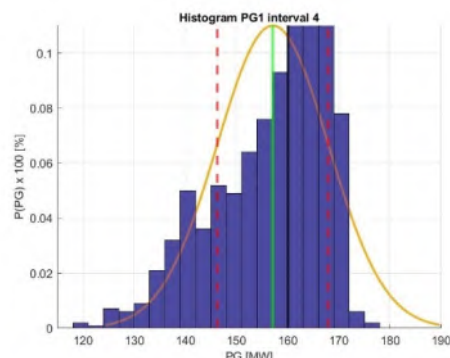
(a)



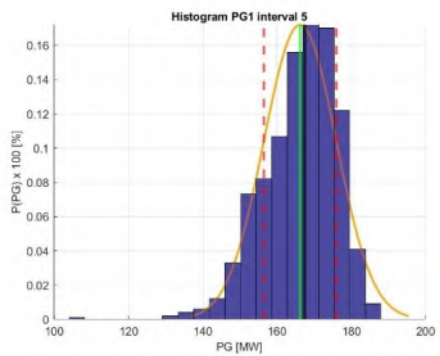
(б)



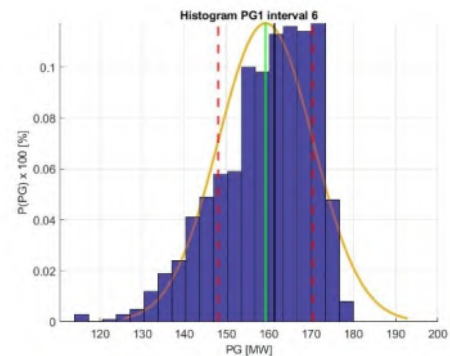
(B)



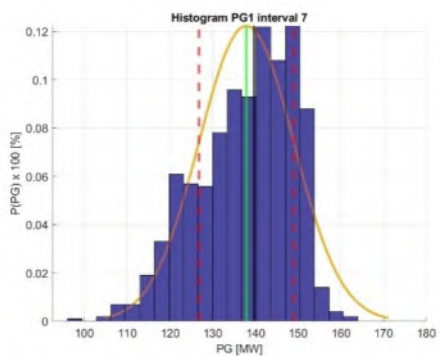
(Г)



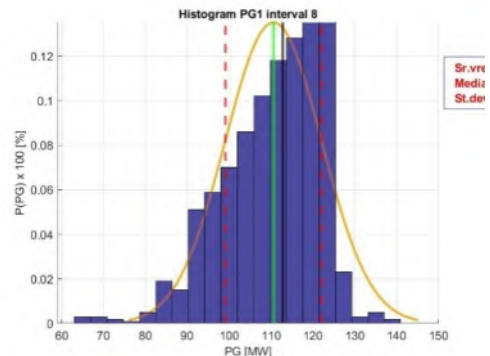
(Д)



(ђ)

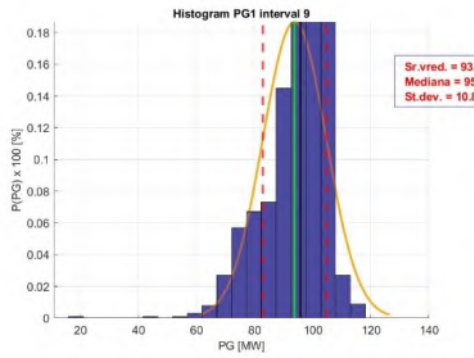


(e)

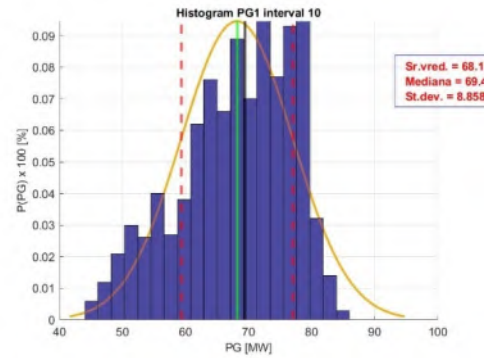


(ж)

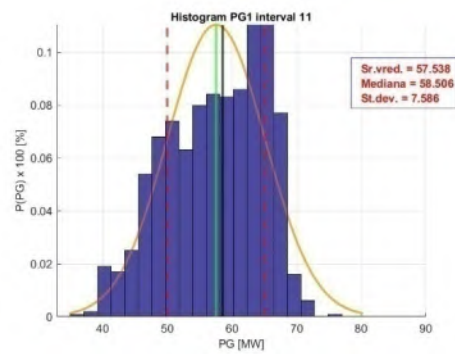




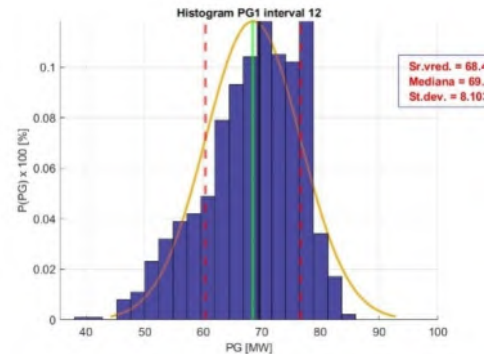
(З)



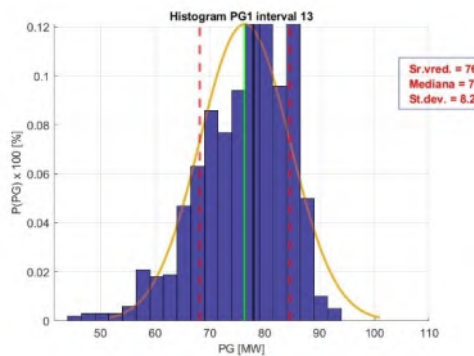
(С)



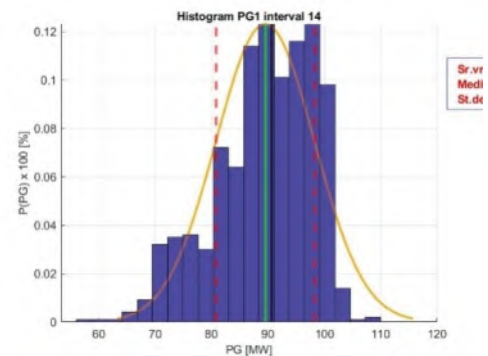
(И)



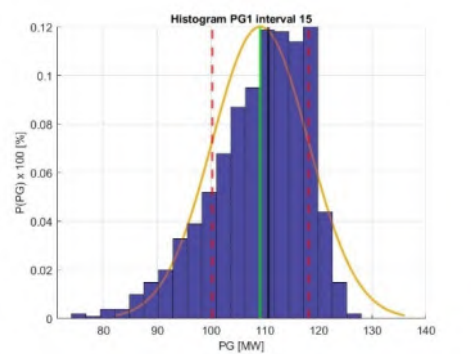
(Ј)



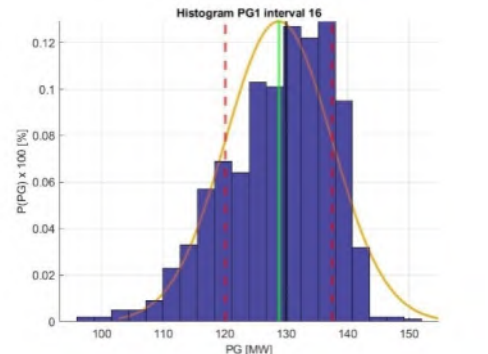
(К)



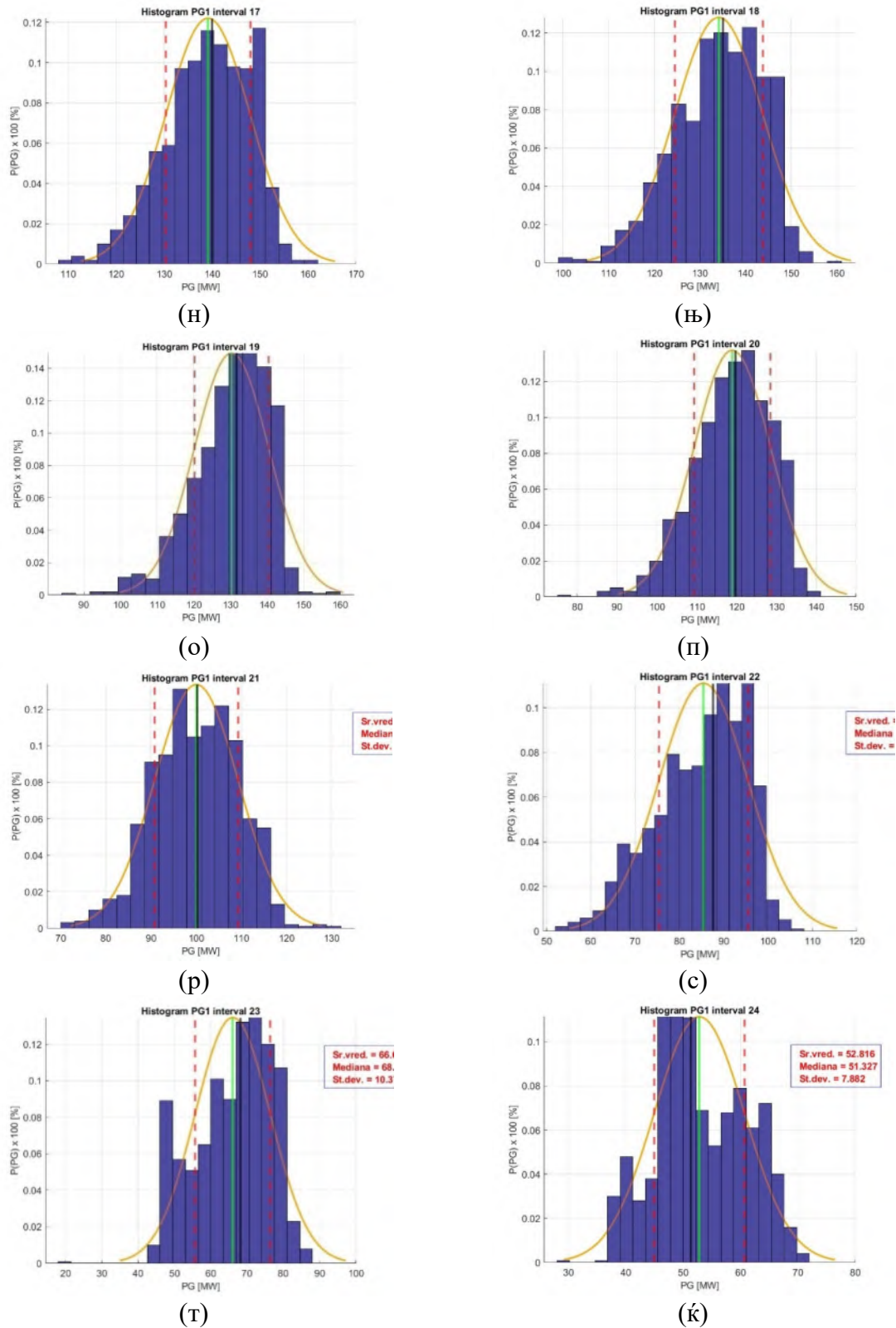
(Л)



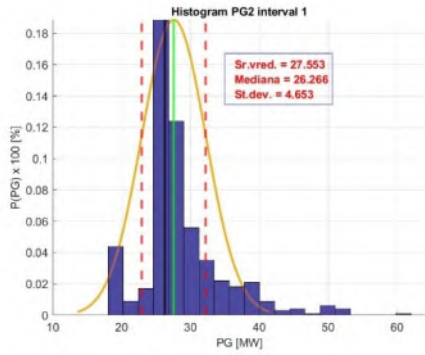
(Љ)



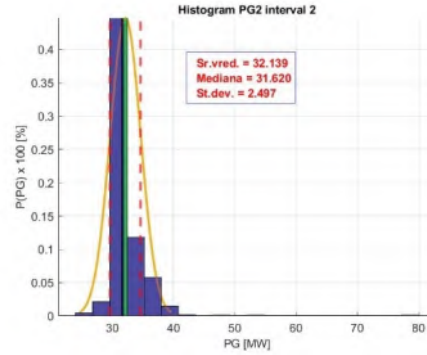
(М)



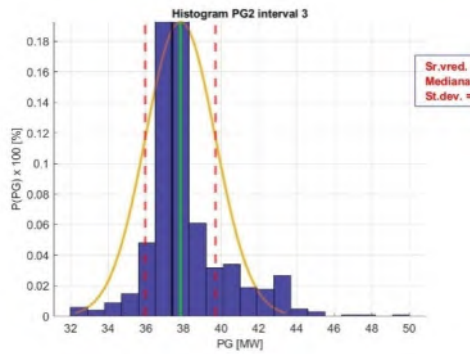
Слика А 1 Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генератор 1



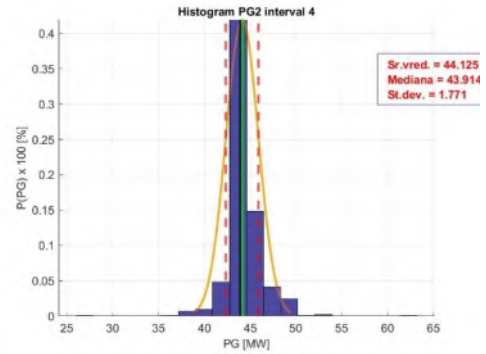
(a)



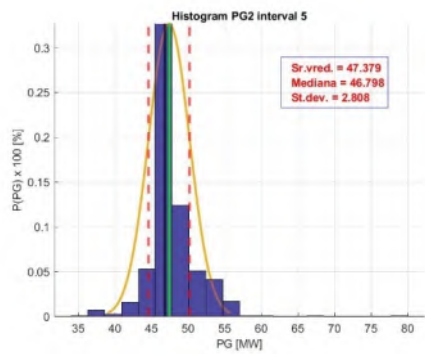
(б)



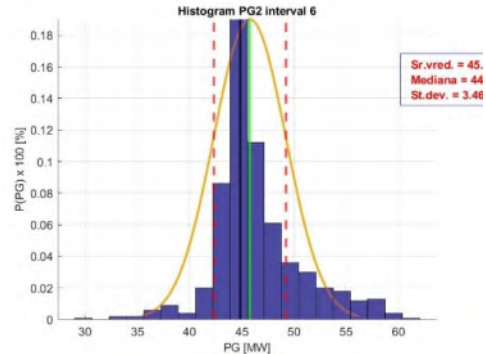
(B)



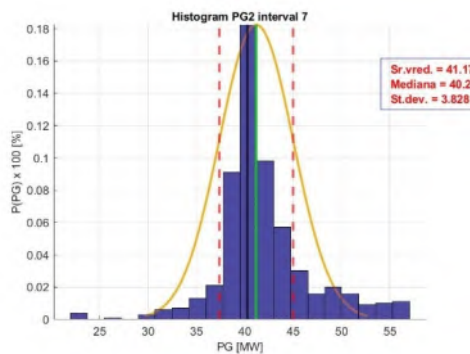
(Г)



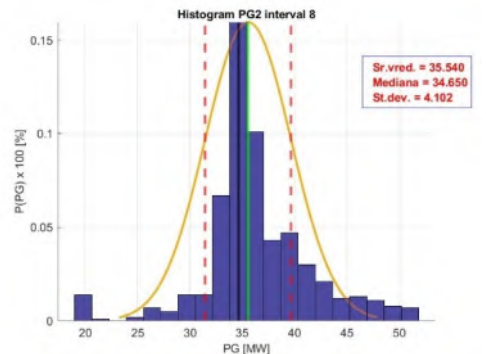
(Д)



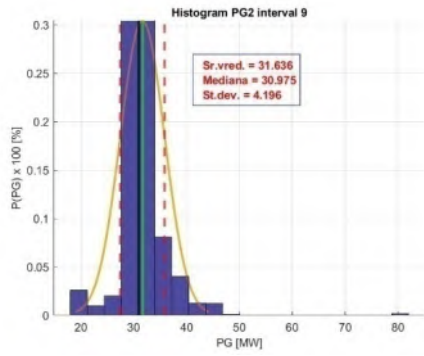
(Г)



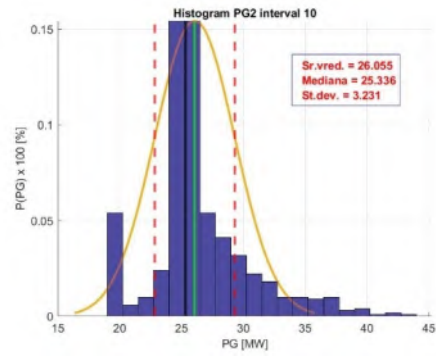
(e)



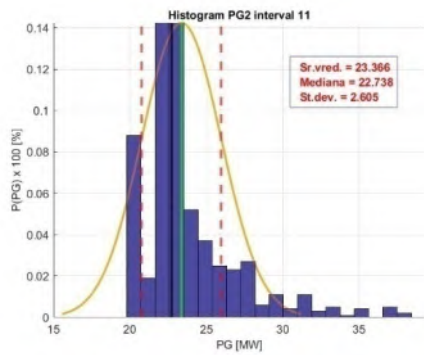
(Ж)



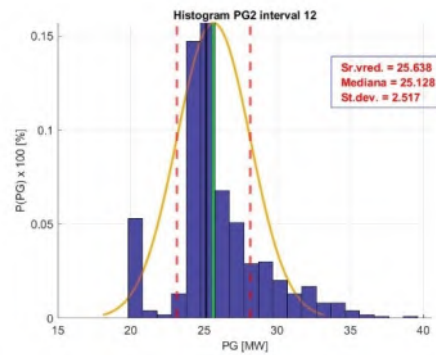
(3)



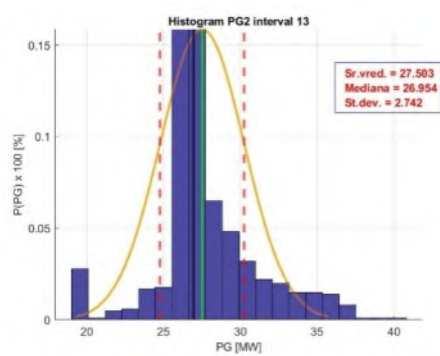
(s)



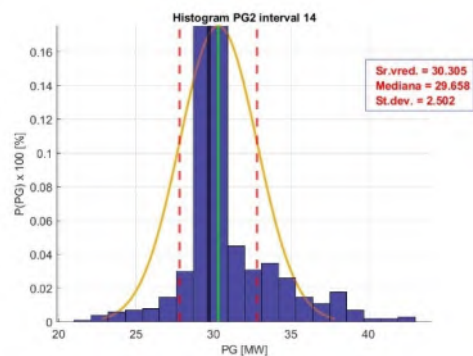
(и)



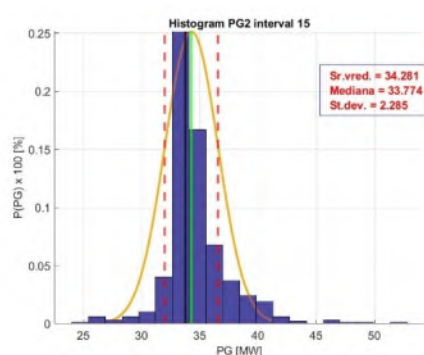
(j)



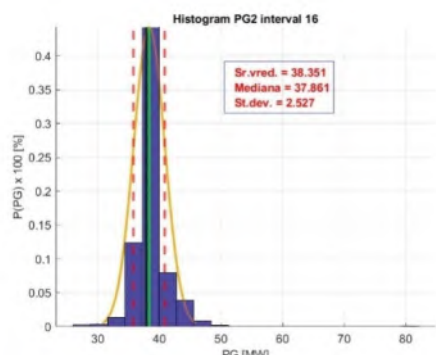
(к)



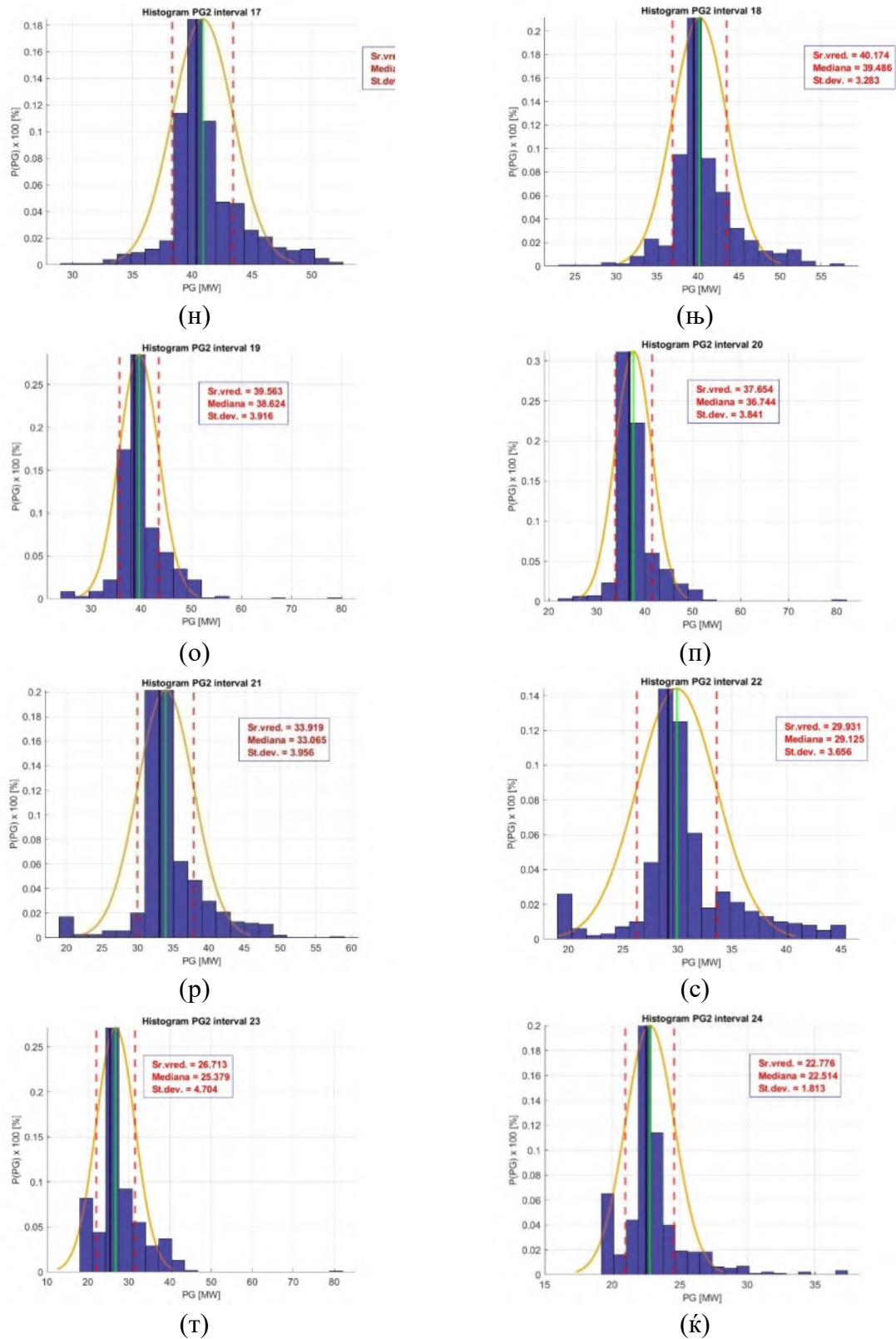
(л)



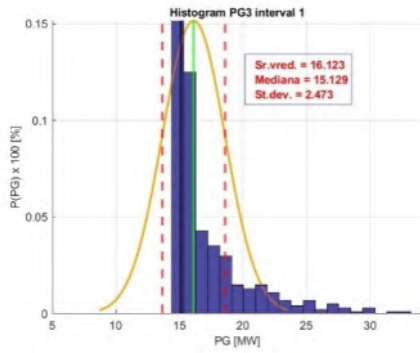
(љ)



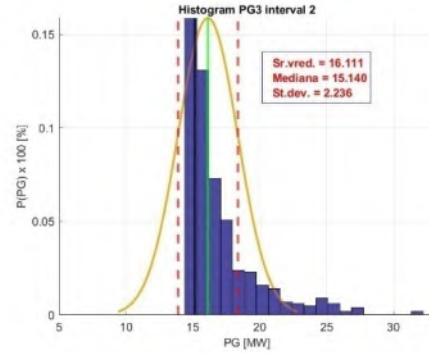
(м)



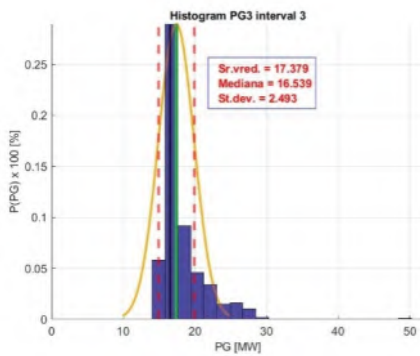
Слика А 2 Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генератор 2



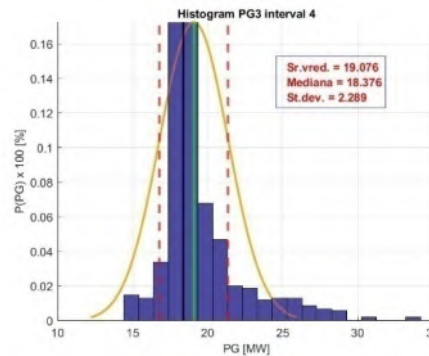
(a)



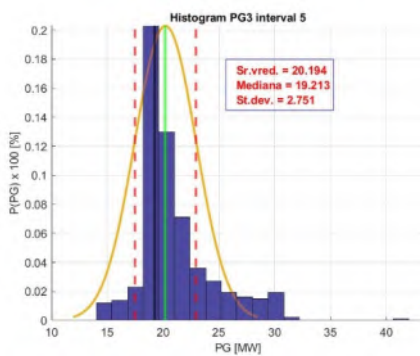
(б)



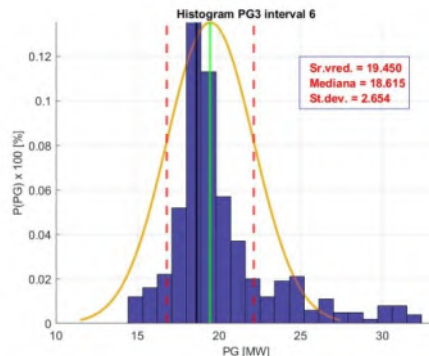
(в)



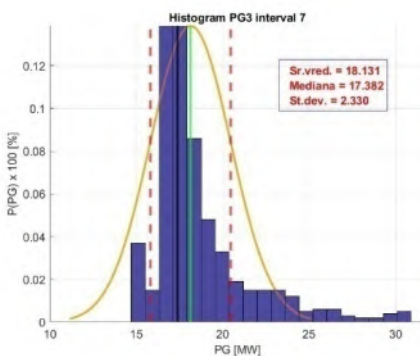
(г)



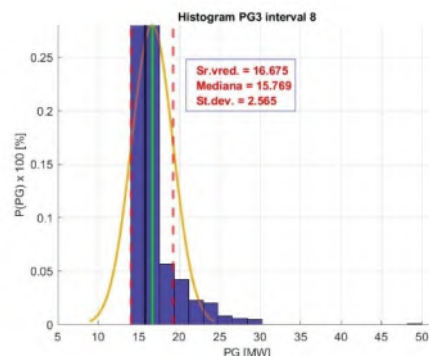
(д)



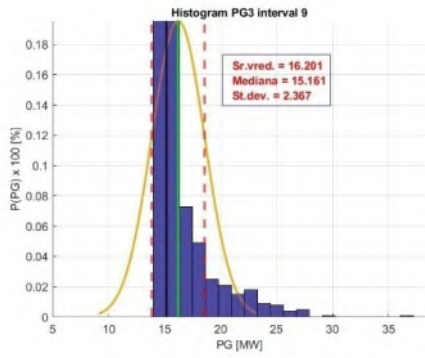
(е)



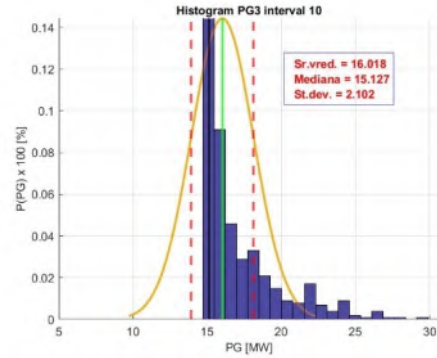
(ж)



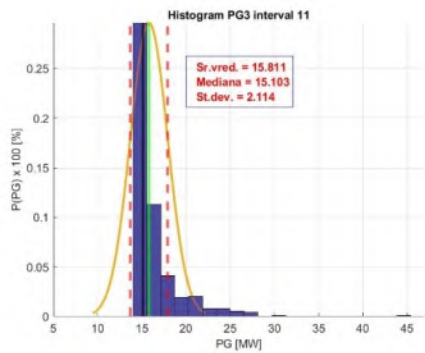
(з)



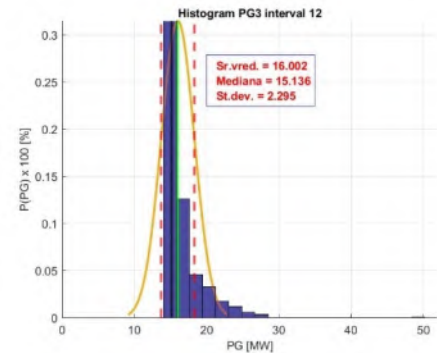
(З)



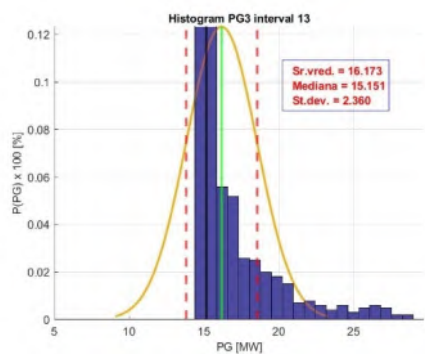
(С)



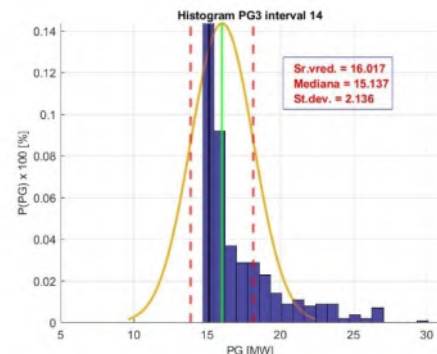
(И)



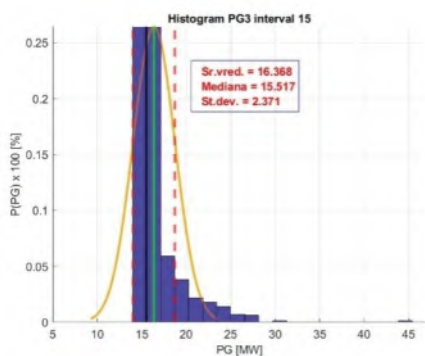
(Ј)



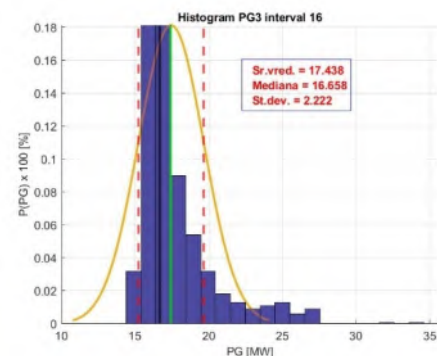
(К)



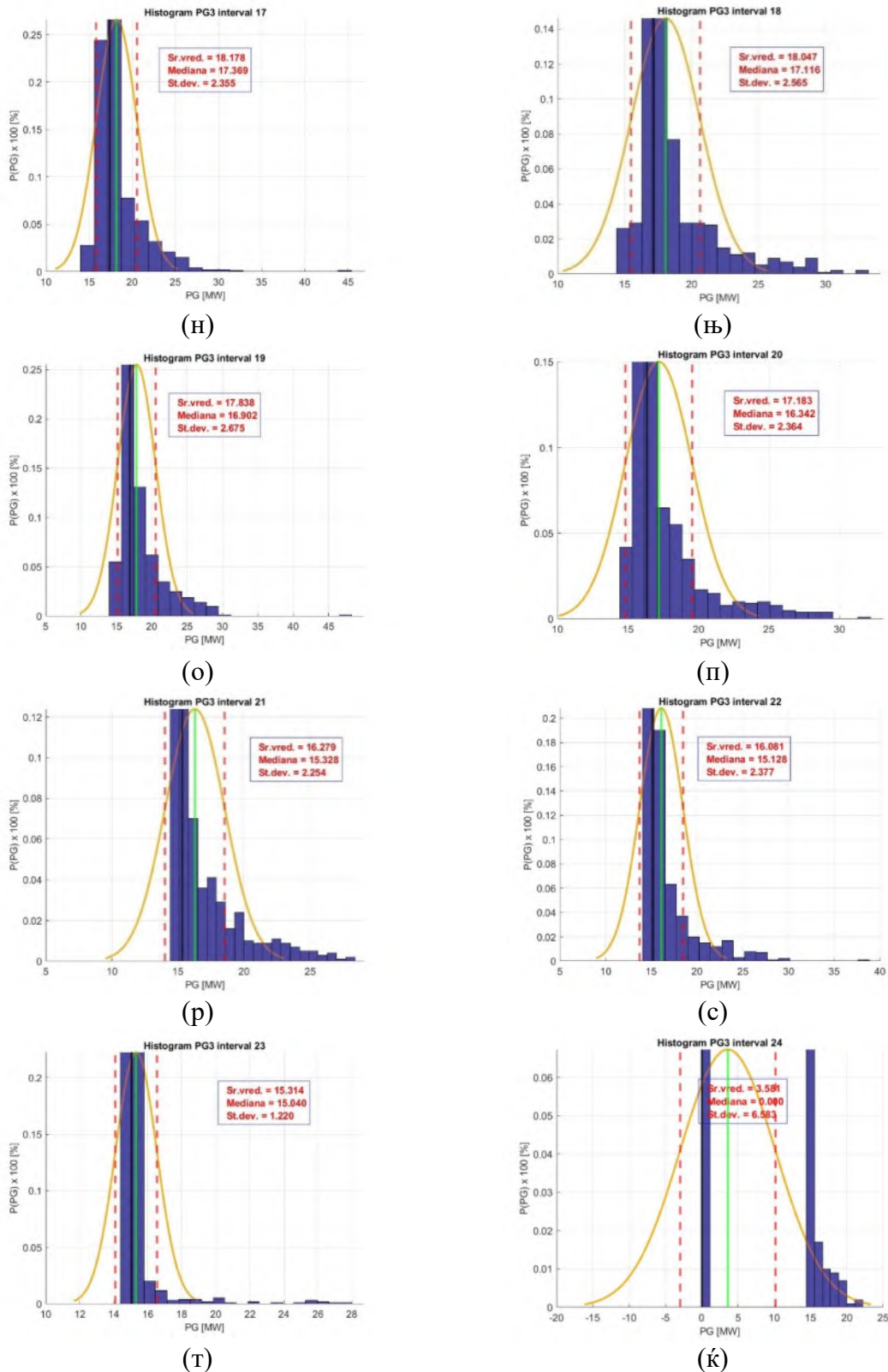
(Л)



(Љ)

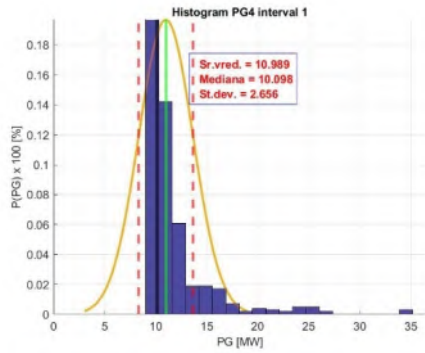


(М)

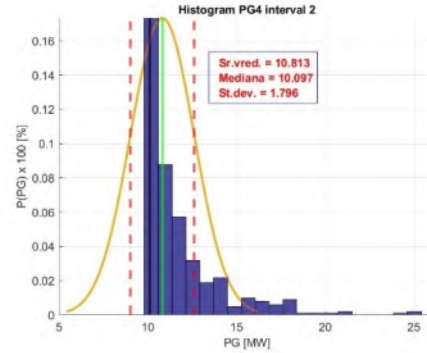


Слика А 3 Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генератор 3

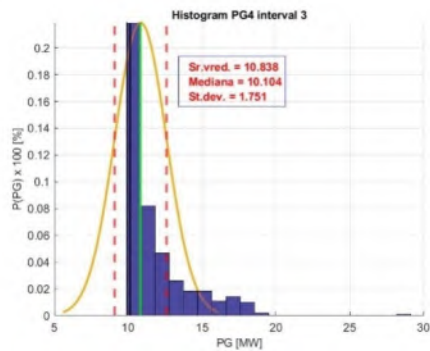




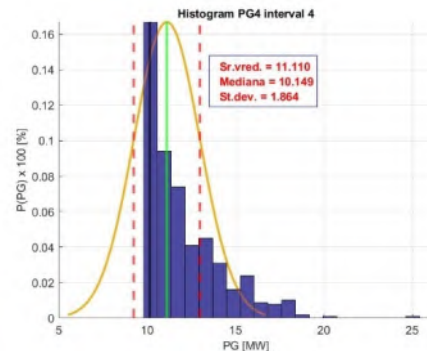
(a)



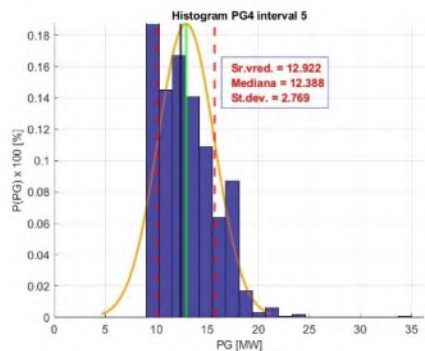
(б)



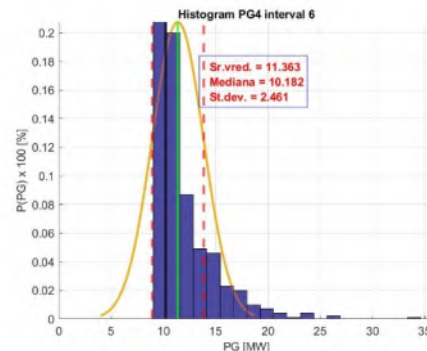
(B)



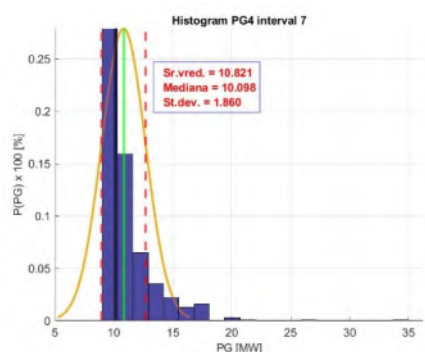
(Г)



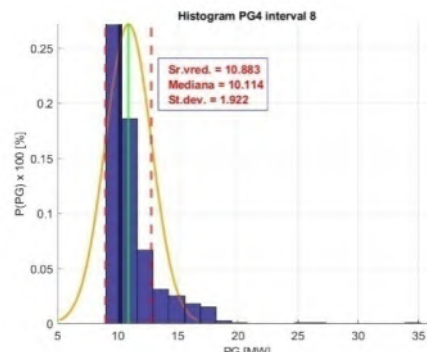
(Д)



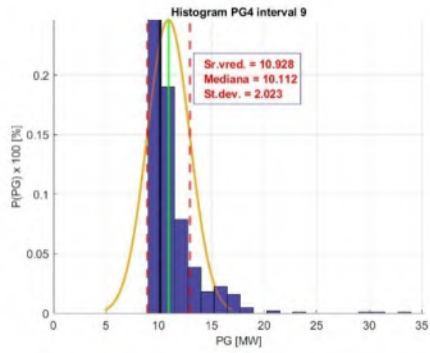
(Г)



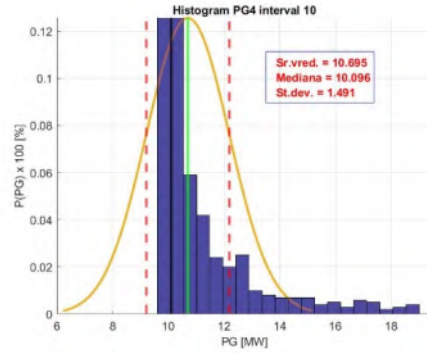
(e)



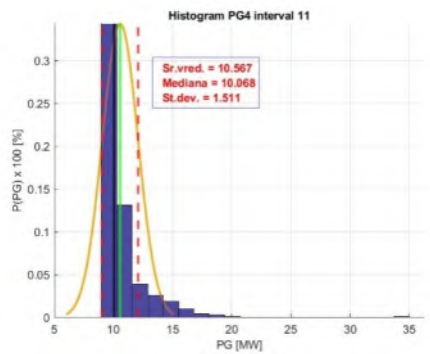
(ж)



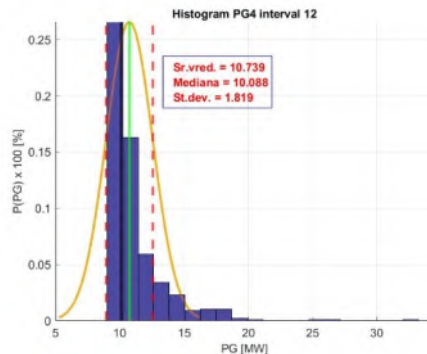
(З)



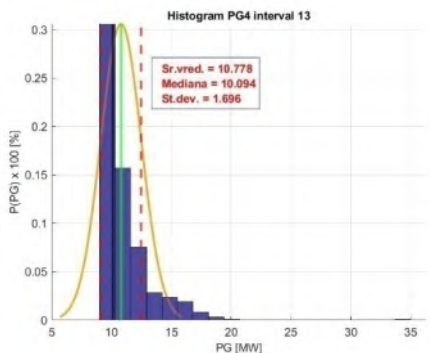
(С)



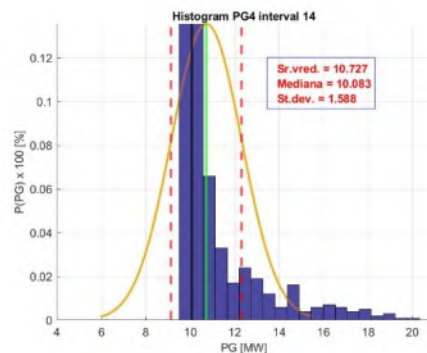
(И)



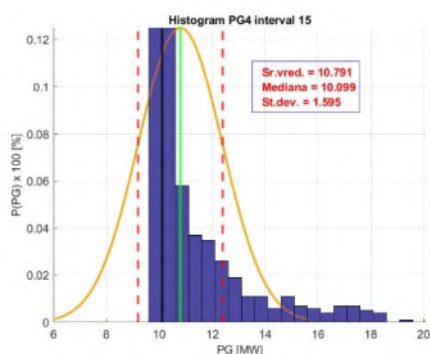
(Ј)



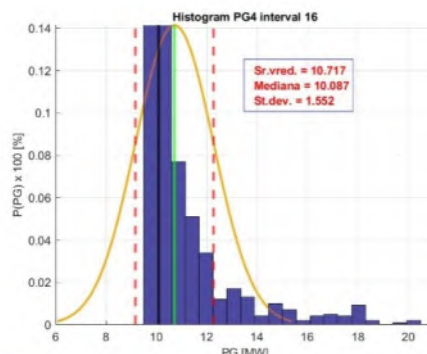
(К)



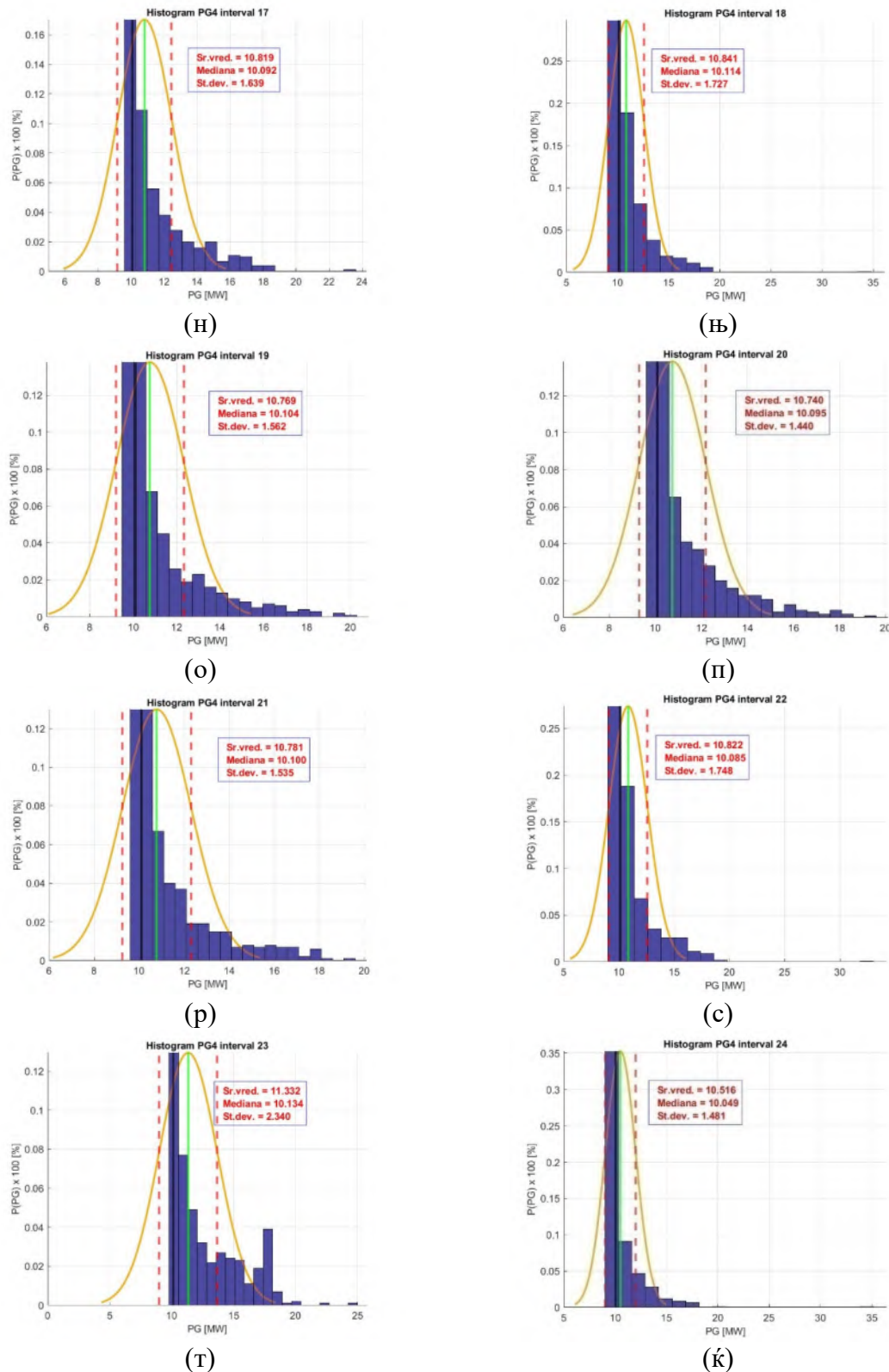
(Л)



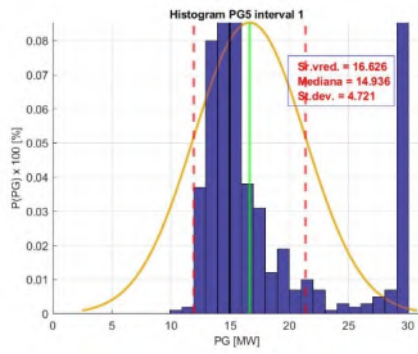
(Љ)



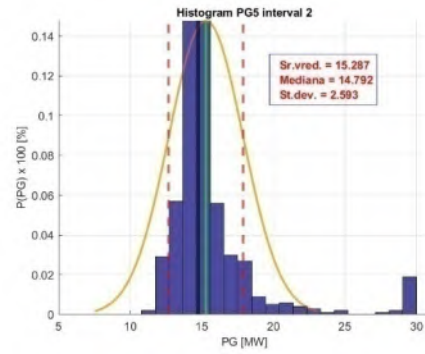
(М)



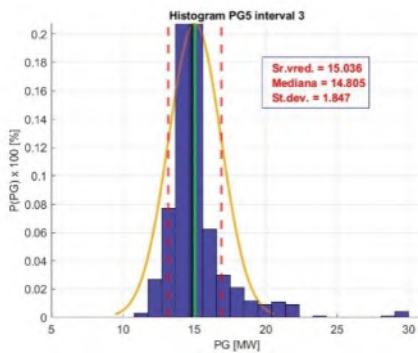
Слика А 4 Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генератор 4



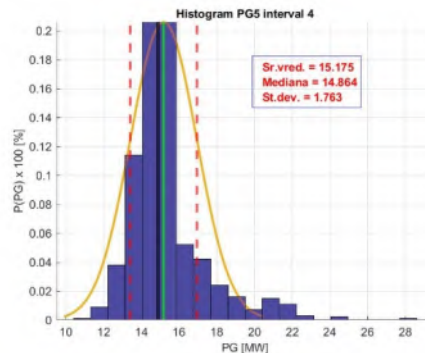
(а)



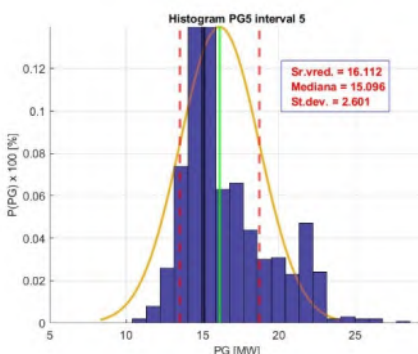
(б)



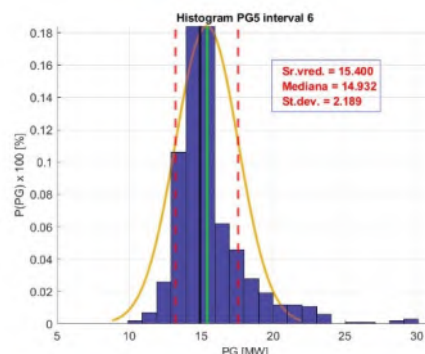
(в)



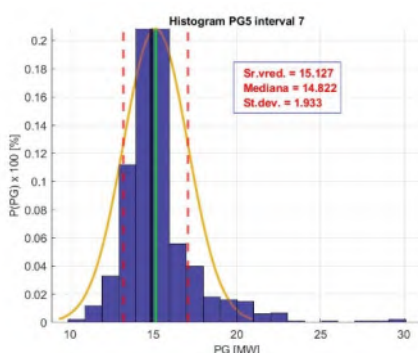
(г)



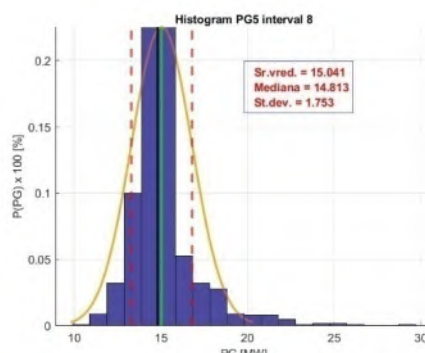
(д)



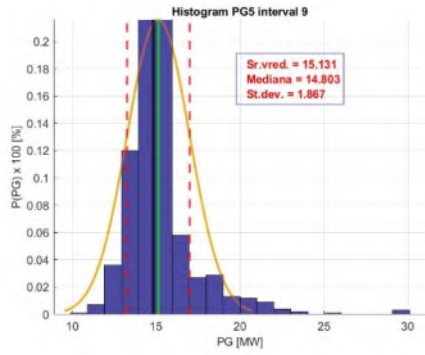
(е)



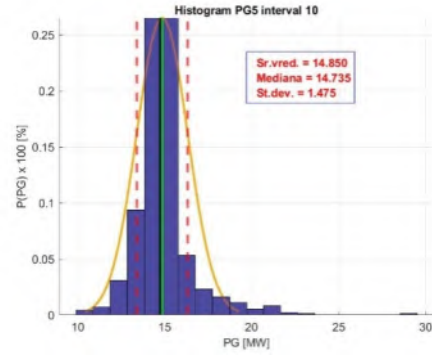
(ж)



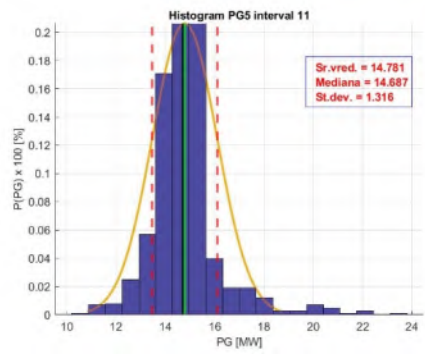
(з)



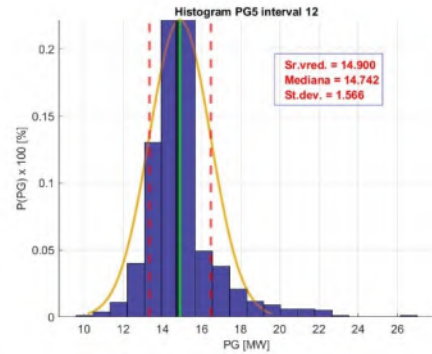
(З)



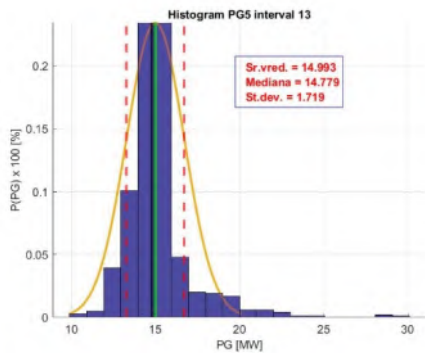
(С)



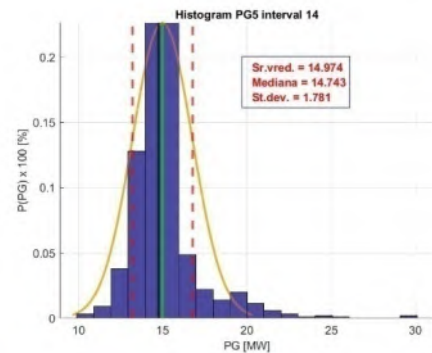
(И)



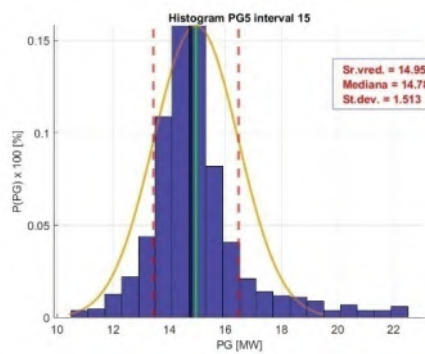
(Ј)



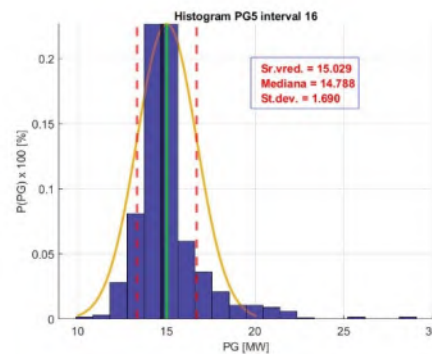
(К)



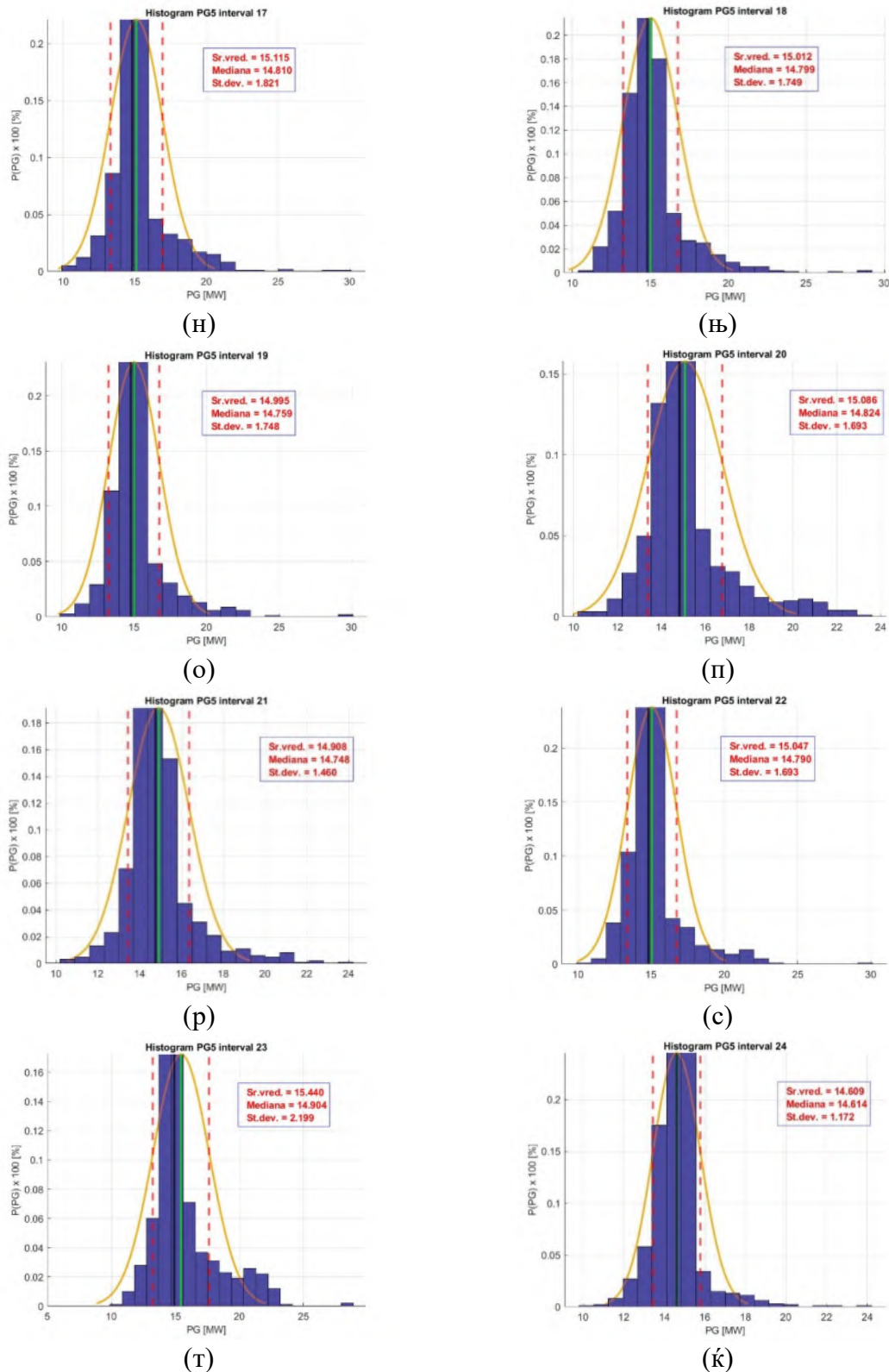
(Л)



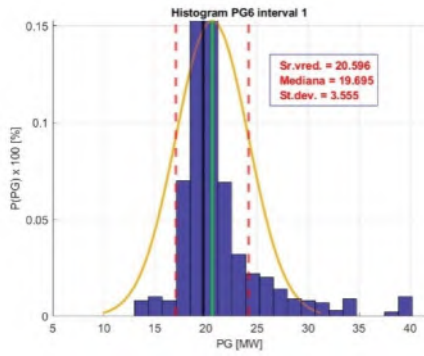
(Љ)



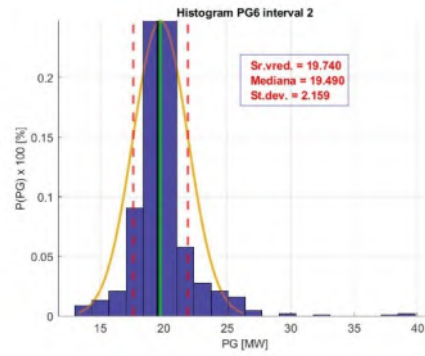
(М)



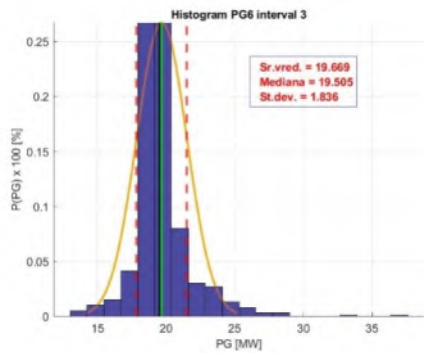
Слика А 5 Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генератор 5



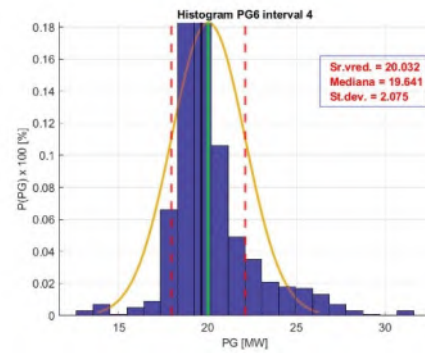
(а)



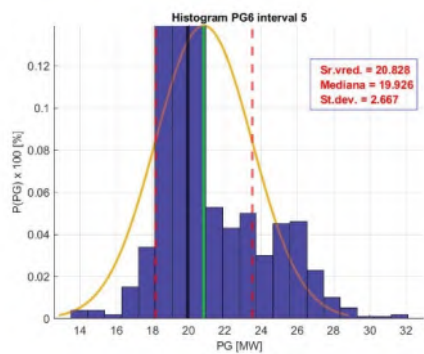
(б)



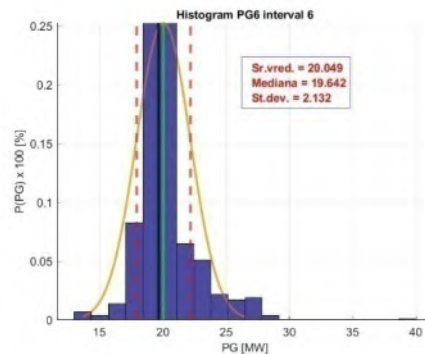
(в)



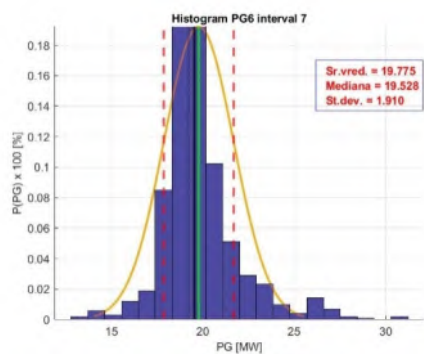
(г)



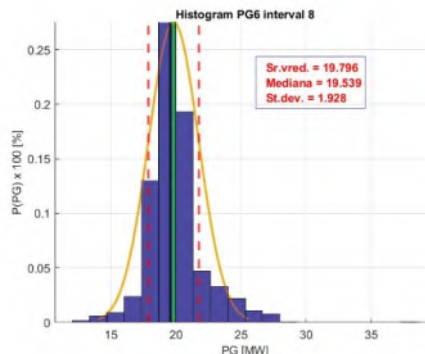
(д)



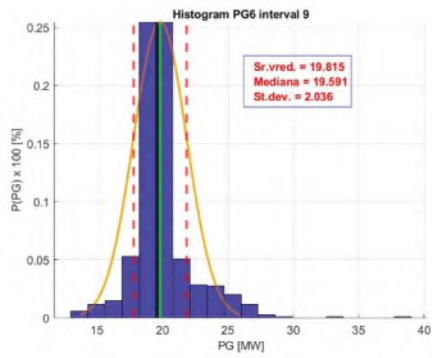
(е)



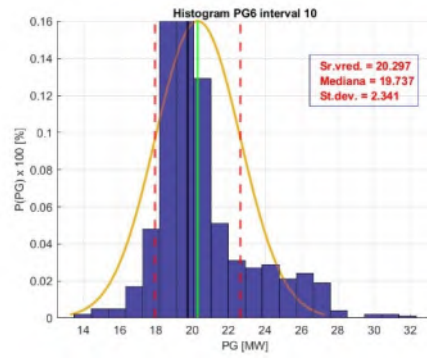
(ж)



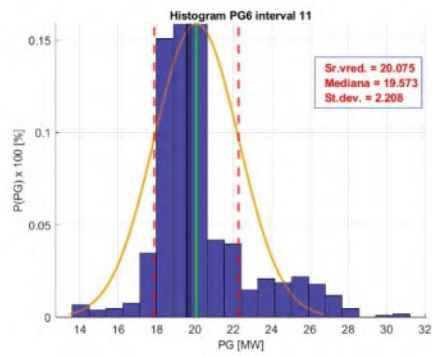
(з)



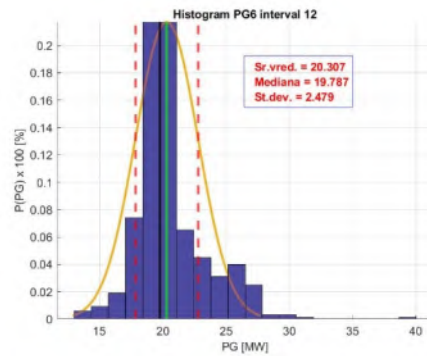
(3)



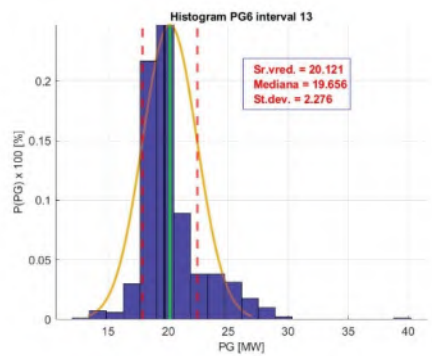
(s)



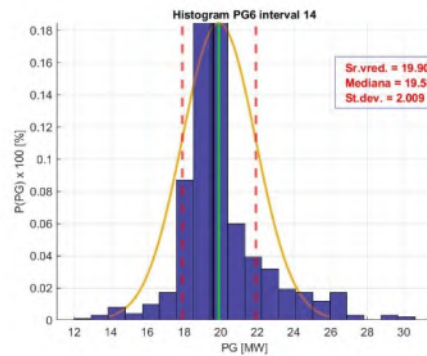
(и)



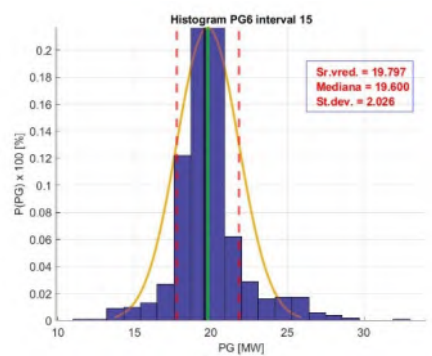
(j)



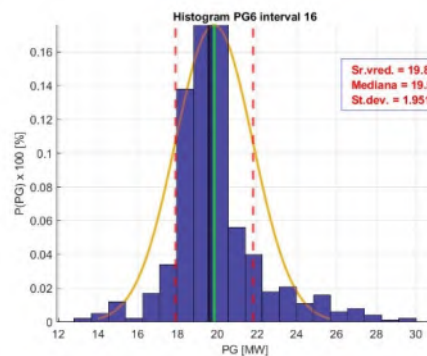
(к)



(л)

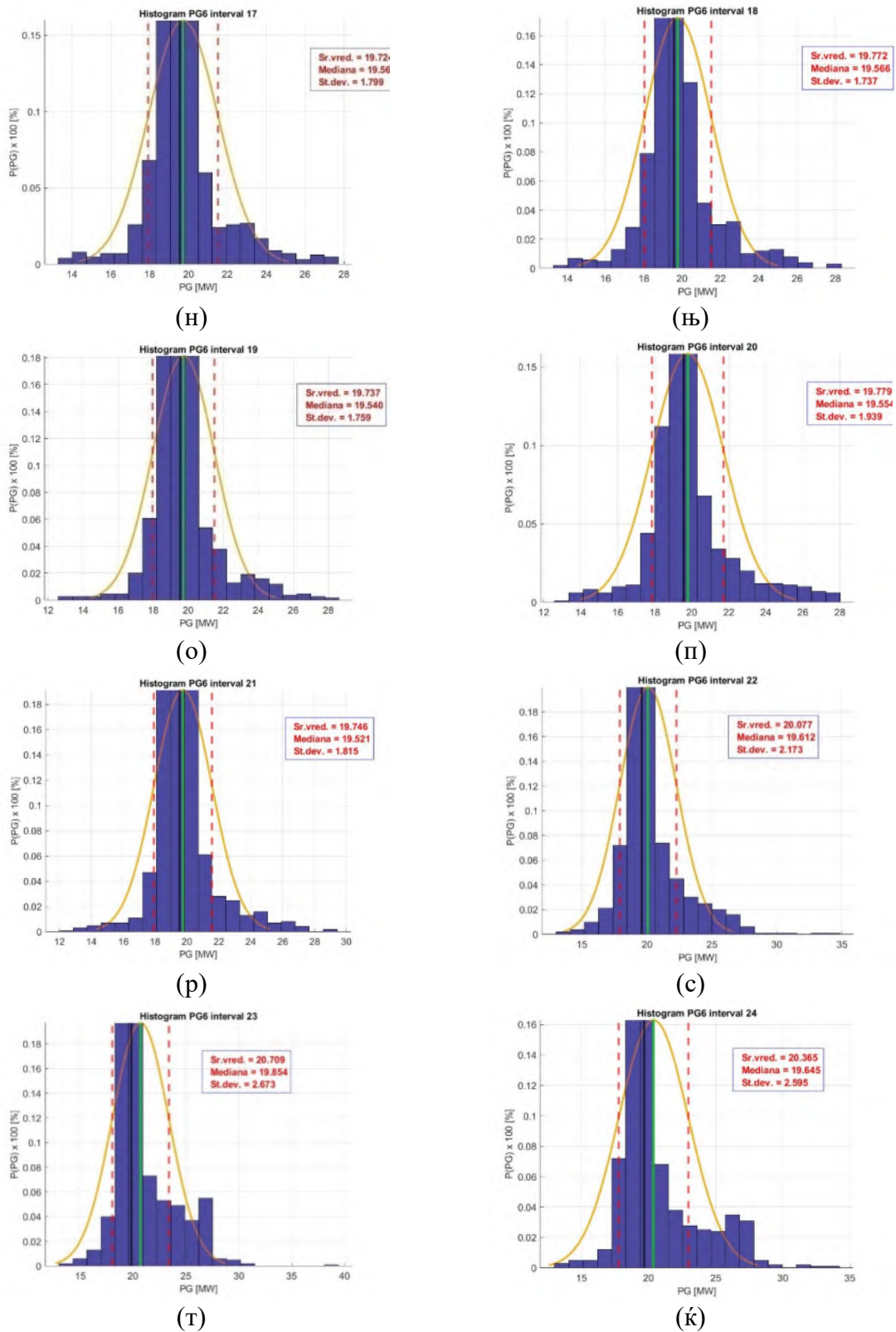


(љ)



(м)





Слика А 6 Хистограми со распределба на веројатноста за активната моќност на генератор 6

## **ОБЈАВЕНИ ТРУДОВИ**

## ЛИСТА НА ОБЈАВЕНИ ТРУДОВИ ОД НАЈТЕСНАТА ОБЛАСТ НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА

- [1] B. Postolov, S. N. Poceva, “Short-term hydrothermal coordination based on primal-dual interior point method,” *Journal of Electrical Engineering and Information Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 23–32, 2020.
- [2] B. Postolov, A. Iliev, “Adaptive genetic algorithm for hydro-thermal unit commitment considering the security constraints,” *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, vol. 4, no. 2, pp. 61–69, 2020.
- [3] B. Postolov, A. Iliev, “Security constrained hydrothermal unit commitment for different hydrological scenarios using genetic algorithm,” *Journal of Electrical Engineering and Information Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 15–28, 2021.
- [4] B. Postolov, A. Iliev, D. Dimitrov, N. Dimishkoska, “N–1 security constrained short-term hydrothermal scheduling by self-adaptive genetic algorithm with PTDF,” 2021 IEEE International Conference on Information Technologies (InfoTech), pp. 1–7, Varna, Bulgaria, 2021.
- [5] B. Postolov, A. Iliev, “New metaheuristic methodology for solving security constrained hydrothermal unit commitment based on adaptive genetic algorithm,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 134, pp. 1–12, 2022.
- [6] B. Postolov, A. Iliev, D. Dimitrov, A. Causevski, S. Nikolova-Poceva, “Novel self-adaptive genetic algorithm for solving AC security constrained short-term hydrothermal scheduling,” 2022 IEEE International Conference on Information Technologies (InfoTech), pp. 1–8, Varna, Bulgaria, 2022.
- [7] B. Postolov, N. Hinov, A. Iliev, D. Dimitrov, “Short-term hydro-thermal-solar scheduling with CCGT based on self-adaptive genetic algorithm,” *Energies*, vol. 15, pp. 1–25, 2022.
- [8] Б. Постолов, А. Илиев, “Современ генетски алгоритам за краткорочна хидро-термокоординација моделирана со АС модел со уважување на сигурносните ограничувања – дел 1: Формулација на проблемот,” Меѓународна конференција Енергетика 2022, Струга, Македонија, 2022, стр. 1–9.
- [9] Б. Постолов, А. Илиев, “Современ генетски алгоритам за краткорочна хидро-термокоординација моделирана со АС модел со уважување на сигурносните ограничувања – дел 2: Решавање на проблемот,” Меѓународна конференција Енергетика 2022, Струга, Македонија, 2022, стр. 1–11.

# **ЛИТЕРАТУРА**

---

**КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА**

- [1] I. Farhat, M. El-Hawary, "Optimization methods applied for solving the short-term hydrothermal coordination problem," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 9, pp. 1308-1320, 2009.
- [2] I. A. Farhat, *Economic and Economic-Emission Operation of All-Thermal and Hydro-Thermal Power Generation Systems Using Bacterial Foraging Optimization*. PhD, Dalhousie University, Halifax, Canada, 2012.
- [3] A. George, *Multi-objective Short-Term Hydrothermal Scheduling based on Traditional and Heuristic Search Methods*. PhD, Dr. M.G.R Educational and Research Institute University, Department of Electrical & Electronics Engineering, Chennai, India, 2011.
- [4] M. El-Hawary, J. Landrigan, "Optimum Operation of Fixed-Head Hydro-Thermal Electric Power Systems: Powell's Hybrid Method Versus Newton-Raphson Method," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 101, no. 3, pp. 547-554, 1982.
- [5] N. Karmarkar, "A new polynomial-time algorithm for linear programming," Proceedings of the 16th annual ACM symposium on Theory of computing, pp. 302-311, 1984.
- [6] M. Kleina, L. C. Matioli, D. C. Marcilio, A. P. Oening, C. A. V. Vallejos, M. R. Bessa, *Interior-Point Method for Hydrothermal Dispatch Problem*. 2012.
- [7] J. Medina, V. H. Quintana, A. J. Conejo, F. P. Thoden, "A comparison of interior-point codes for medium-term hydro-thermal coordination," Proceedings of the 20th International Conference on Power Industry Computer Applications, Columbus, OH, USA, pp. 224-231, 1997.
- [8] H. Wei, H. Sasaki, J. Kubokawa, "A decoupled solution of hydro-thermal optimal power flow problem by means of interior point method and network programming," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 286-293, 1998.
- [9] J. Medina, V. Quintana, A. Conejo, "A clipping-off interior-point technique for medium-term hydro-thermal coordination," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 266-273, 1999.
- [10] R. Fuentes-Loyola, V. H. Quintana, M. Madrigal, "A performance comparison of a primal-dual interior point method vs. Lagrangian relaxation to solve the medium term hydro-thermal coordination problem," IEEE in Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 4, pp. 2255-2260, 2000.
- [11] H. Wei, H. Sasaki, J. Kubokawa, R. Yokoyama, "Large scale hydrothermal optimal power flow problems based on interior point nonlinear programming," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 396-403, 2000.
- [12] J. L. M. Ramos, A. T. Lora, J. R. Santos, A. G. Expósito, "Short-term hydro-thermal coordination based on interior point nonlinear programming and genetic algorithms," IEEE Porto in Power Tech Proceedings, vol. 3, pp. 6, 2001.
- [13] T. Forrest, D. Lidgate, J. Bickford, "Towards a more comprehensive approach to hydro-thermal power system scheduling by Lagrangian relaxation," Third International Conference on Power System Monitoring and Control, pp. 252-254, 1991.
- [14] H. Yan, P. B. Luh, L. Zhang, "Scheduling of hydrothermal power systems using the augmented Lagrangian decomposition and coordination technique," American Control Conference, vol. 2, pp. 1558-1562, 1994.

- [15] G. Xiaohong, P. B. Luh, Z. Lan, "Nonlinear approximation method in Lagrangian relaxation-based algorithms for hydrothermal scheduling," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 772-778, 1995.
- [16] S. Ruzic, R. Rajakovic, "Optimal distance method for Lagrangian multipliers updating in short-term hydro-thermal coordination," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 1439-1444, 1998.
- [17] M. S. Salam, K. M. Nor, A. R. Hamdam, "Hydrothermal scheduling based Lagrangian relaxation approach to hydrothermal coordination," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 226-235, 1998.
- [18] N. J. Redondo, A. J. Conejo, "Short-term hydro-thermal coordination by Lagrangian relaxation: solution of the dual problem," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 89-95, 1999.
- [19] E. Xi, X. Guan, R. Li, "Scheduling hydrothermal power systems with cascaded and head-dependent reservoirs," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1127-1132, 1999.
- [20] J. Ngundam, F. Kenfack, T. T. Tatiétsé, "Optimal scheduling of large-scale hydrothermal power systems using the Lagrangian relaxation technique," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 237-245, 2000.
- [21] S. Al-Agtash, "Hydrothermal scheduling by augmented Lagrangian: consideration of transmission constraints and pumped-storage units," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 750-756, 2001.
- [22] A. Borghetti, A. Frangioni, F. Lacalandra, C. A. Nucci "Lagrangian heuristics based on disaggregated Bundle methods for hydrothermal unit commitment," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 313-323, 2003.
- [23] E. C. Finardi, E. L. da Silva "Solving the hydro unit commitment problem via dual decomposition and sequential quadratic programming," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 835-844, 2006.
- [24] A. Diniz, C. Sagastizábal, M. Maceira, "Assessment of Lagrangian relaxation with variable splitting for hydrothermal scheduling," 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-8, 2007.
- [25] R. H. Liang, M. H. Ke, Y. T. Chen, "Coevolutionary Algorithm Based on Lagrangian Method for Hydrothermal Generation Scheduling," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 499-507, 2009.
- [26] F. Y. Takigawa, E. C. Finardi, E. L. da Silva, "A decomposition strategy to solve the short-term hydrothermal scheduling based on lagrangian relaxation," 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), Sao Paulo, Brazil, pp. 681-688, 2010.
- [27] C. Liu, M. Shahidehpour, J. Wang, "Application of augmented Lagrangian relaxation to coordinated scheduling of interdependent hydrothermal power and natural gas systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 4, no. 12, pp. 1314-1325, 2010.
- [28] R. N. Rodrigues, E. L. da Silva, E. C. Finardi, F. Y. K. Takigawa, "Solving the short-term scheduling problem of hydrothermal systems via Lagrangian relaxation and augmented Lagrangian," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, pp. 1-18, Feb. 2012.
- [29] N. Amjadi, M. R. Ansari, "Hydrothermal unit commitment with AC constraints by a new solution method based on benders decomposition," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 57-65, 2013.

- [30] S.N. Yu, "Using hybrid EP and multi-pass dynamic programming for hydrothermal coordination considering reasonable spinning reserve," 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, TX, USA, pp. 903-908, 2006.
- [31] T. H. deMello, V. L. de Matos, E. C. Finardi, "Sampling strategies and stopping criteria for stochastic dual dynamic programming: a case study in long-term hydrothermal scheduling," *Energy Systems*, vol. 2, no. 1, 31, 2011.
- [32] K. S. Gjerden, A. Helseth, B. Mo, G. Warland, "Hydrothermal scheduling in Norway using stochastic dual dynamic programming; a large-scale case study," 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, Netherlands, pp. 1-6, 2015.
- [33] G. W. Chang et al., "Experiences with mixed integer linear programming based approaches on short-term hydro scheduling," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 743-749, 2001.
- [34] M. Basu, "Hopfield neural networks for optimal scheduling of fixed head hydrothermal power systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 64, no. 1, pp. 11-15, 2003.
- [35] B. Monte, S. Soares, "Fuzzy inference systems approach for long term hydrothermal scheduling," 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, WA, USA, pp. 1-7, 2006.
- [36] R. A. Rabêlo, R. A. Fernandes, I. N. Silva, "Operational planning of hydrothermal systems based on a fuzzy-PSO approach," 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Brisbane, QLD, Australia, pp. 1-8, 2012.
- [37] R. de AL Rabêlo, A. A. Carneiro, F. A. Borges, R. A. Fernandes, R. T. Braga, *An Application of Genetic Fuzzy Systems to the Operation Planning of Hydrothermal Systems*. Energy Storage in the Emerging Era of Smart Grids. InTech, 2011.
- [38] E. Gil, J. Bustos, H. Rudnick, "Short-term hydrothermal generation scheduling model using a genetic algorithm," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 1256-1264, 2003.
- [39] C. E. Zoumas, A. G. Bakirtzis, J. B. Theocharis, V. Petridis, "A genetic algorithm solution approach to the hydrothermal coordination problem," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1356-1364, 2004.
- [40] P. T. Leite, A. A. Carneiro, A. C. Carvalho, "Hybrid genetic algorithm applied to the determination of the optimal operation of hydrothermal systems," 2006 Ninth Brazilian Symposium on Neural Networks (SBRN'06), Ribeirao Preto, Brazil, pp. 84-89, 2006.
- [41] S. Kumar, R. Naresh, "Efficient real coded genetic algorithm to solve the non-convex hydrothermal scheduling problem," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 29, no. 10, pp. 738-747, 2007.
- [42] M. Kumar VS, MR, "Optimal short-term hydro-thermal scheduling using decomposition approach and GA based OPF," *Journal of Electrical Systems*, vol. 5, 2009.
- [43] J. Sasikala, M. Ramaswamy, "Optimal gamma based fixed head hydrothermal scheduling using genetic algorithm," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 4, pp. 3352-3357, 2010.
- [44] V. S. Kumar, M. Mohan, "A genetic algorithm solution to the optimal short-term hydrothermal scheduling," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, no. 4, pp. 827-835, 2011.
- [45] J. S. Dhillon, J. Dhillon, D. Kothari, "Real coded genetic algorithm for stochastic hydrothermal generation scheduling," *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, vol. 20, pp. 87-109, 2011.

- [46] M. Salama, M. Elgazar, S. Abdelmaksoud, H. Henry, "Short Term Optimal Generation Scheduling of Fixed Head Hydrothermal System Using Genetic Algorithm and Constriction Factor Based Particle Swarm Optimization Technique," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, no. 5, pp. 1-9, 2013.
- [47] M. Salama, M. Elgazar, S. Abdelmaksoud, H. Henry, "Optimal generation scheduling of cascaded hydrothermal system using genetic algorithm and constriction factor based particle swarm optimization technique," *International Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 4, no.5, pp. 750-761, 2013.
- [48] N. Fang, J. Zhou, R. Zhang, Y. Liu, Y. Zhang, "A hybrid of real coded genetic algorithm and artificial fish swarm algorithm for short-term optimal hydrothermal scheduling," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 62, pp. 617-629, 2014.
- [49] Y. Wang, J. Zhou, C. Zhou, Y. Wang, H. Qin, Y. Lu, "An improved self-adaptive PSO technique for short-term hydrothermal scheduling," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no.3, pp. 2288-2295, 2012.
- [50] J. Zhang, J. Wang, C. Yue, "Small Population-Based Particle Swarm Optimization for Short-Term Hydrothermal Scheduling," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 142-152, 2012.
- [51] V. Hinojosa, C. Leyton, "Short-term hydrothermal generation scheduling solved with a mixed-binary evolutionary particle swarm optimizer," *Electric Power Systems Research*, 2012, vol. 92, pp. 162-170.
- [52] M. Salama, M. Elgazar, S. Abdelmaksoud, H. Henry, "Short Term Optimal Generation Scheduling of Multi-Chain Hydrothermal System Using Constriction Factor Based Particle Swarm Optimization Technique (CFPSO)," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, no. 4, pp. 1-9, 2013.
- [53] K. Dasgupta, S. Banerjee, "Short-term hydrothermal scheduling using particle swarm optimization with constriction Factor and Inertia Weight Approach," 2014 First International Conference on Automation, Control, Energy and Systems (ACES), Adisaptagram, India, pp 1-6, 2014.
- [54] N. Narang, J. Dhillon, D. Kothari, "Scheduling short-term hydrothermal generation using predator prey optimization technique," *Applied Soft Computing*, 2014, vol. 21, pp. 298-308.
- [55] V. K. Jadoun, N. Gupta, K. Niazi, A. Swarnkar, R. Bansal, "Short-term non-convex economic hydrothermal scheduling using dynamically controlled particle swarm optimization," 3rd Southern African Solar Energy Conference, Kruger National Park, South Africa, pp 1-6, May, 2015
- [56] A. Rasoulzadeh-akhijahani, B. Mohammadi-ivatloo, "Short-term hydrothermal generation scheduling by a modified dynamic neighborhood learning based particle swarm optimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 67, pp. 350-367, 2015.
- [57] J. Zhang, S. Lin, X. Fan, Y. Guo, "An Improved Differential Evolution Approach for Short-term Hydrothermal Scheduling," *Journal of Information & Computational Science*, vol. 12, pp. 1817-1829, 2015.
- [58] T. N. Malik, S. Zafar, S. Haroon, "An improved chaotic hybrid differential evolution for the short-term hydrothermal scheduling problem considering practical constraints," *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, vol. 16, pp. 404-417, 2015.



- [59] N. Gouthamkumar, V. Sharma, R. Naresh, “Disruption based gravitational search algorithm for short term hydrothermal scheduling,” *Expert Systems with Applications*, vol.42, no.20, pp. 7000-7011, 2015
- [60] N. Gouthamkumar, V. Sharma, R. Naresh, “Hybridized Gravitational Search Algorithm for Short-Term Hydrothermal Scheduling,” *IETE Journal of Research*, vol. 62, no.4, pp. 468-478, 2016.
- [61] V. Ferreira, G. H. C. Silva, “Natural optimization applied to medium-term hydrothermal coordination,” 2011 16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, Hersonissos, Greece, pp1-6, 2011.
- [62] N. C. Nayak, C. C. A. Rajan, “An evolutionary programming embedded Tabu search method for hydro-thermal scheduling with cooling-banking constraints,” *Journal of Engineering and Technology Research*, vol. 5, no.2, pp. 21-32, 2013.
- [63] T. T. Nguyen, B. H. Dinh, N. V. Quynh, M. Q. Duong, L. V. Dai, “A Novel Algorithm for Optimal Operation of Hydrothermal Power Systems under Considering the Constraints in Transmission Networks,” *Energies*, vol. 11, no.1, 188, 2018.
- [64] T. T. Nguyen, L. H. Pham, L. C, Mohammadi, “Optimal Scheduling of Large-Scale Wind-Hydro-Thermal Systems with Fixed-Head Short-Term Model,” *Applied Sciences*, vol. 10, no.8, 2964, 2020.
- [65] X. Lin, S. Ke, Z. Li, H. Weng, X. Han, “A fault diagnosis method of power systems based on improved objective function and genetic algorithm-tabu search,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1268-1274, 2010.
- [66] B. Postolov, S. N. Poceva, “Short-term hydrothermal coordination based on primal-dual interior point method,” *Journal of Electrical Engineering and Information Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 23–32, 2020.
- [67] B. Postolov, A. Iliev, “Adaptive genetic algorithm for hydro-thermal unit commitment considering the security constraints,” *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, vol. 4, no. 2, pp. 61–69, 2020.
- [68] B. Postolov, A. Iliev, “Security constrained hydrothermal unit commitment for different hydrological scenarios using genetic algorithm,” *Journal of Electrical Engineering and Information Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 15–28, 2021.
- [69] B. Postolov, A. Iliev, “New metaheuristic methodology for solving security constrained hydrothermal unit commitment based on adaptive genetic algorithm,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 134, pp. 1–12, 2022.
- [70] B. Postolov, A. Iliev, D. Dimitrov, N. Dimishkoska, “N–1 security constrained short-term hydrothermal scheduling by self-adaptive genetic algorithm with PTDF,” 2021 International Conference on Information Technologies (InfoTech), Varna, Bulgaria, pp. 1–7, 2021.
- [71] B. Postolov, N. Hinov, A. Iliev, D. Dimitrov, “Short-term hydro-thermal-solar scheduling with CCGT based on self-adaptive genetic algorithm,” *Energies*, vol. 15, no. 16, 5989, 2022.
- [72] B. Postolov, A. Iliev, D. Dimitrov, A. Causevski, S. Nikolova-Poceva, “Novel self-adaptive genetic algorithm for solving AC security constrained short-term hydrothermal scheduling,” 2022 International Conference on Information Technologies (InfoTech), Varna, Bulgaria, pp. 1–8, 2022.
- [73] Б. Постолов, А. Илиев, “Современ генетски алгоритам за краткорочна хидро-термокоординација моделирана со AC модел со уважување на сигурносните ограничувања – дел 1: Формулација на проблемот,”

- Меѓународна конференција Енергетика 2022, Струга, Македонија, стр. 1–9, 2022.
- [74] Б. Постолов, А. Илиев, “Современ генетски алгоритам за краткорочна хидро-термокоординација моделирана со АС модел со уважување на сигурноснитеограничувања – дел 2: Решавање на проблемот,” Меѓународна конференција Енергетика 2022, Струга, Македонија, стр. 1–11, 2022.
- [75] X. S. Yang, *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. Elsevier, 2014.
- [76] E. G. Talbi, *Metaheuristics from design to implementation*. New Jersey: A John Wiley & Sons, 2009.
- [77] K. Sörensen, “Metaheuristics - the metaphor exposed,” *International Transactions in Operational Research*, vol. 22, pp. 3-18, 2015.
- [78] J. Radosavljević, *Metaheuristic Optimization in Power Engineering*. United Kingdom, London: The Institution of Engineering and Technology, 2018.
- [79] S. Sumathi, Surekha Paneerselvam, *Computational intelligence paradigms : theory & applications using MATLAB*. CRC Press, 2010.
- [80] D. H. Wolpert, W. G. Macready, “No free lunch theorems for optimization,” *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 67-82, 1997.
- [81] M. Calovic, A. Saric, P. Stefanov, *Eksploatacija elektroenergetskih sistem u uslovima slobodnog trzista*. Cacak, Beograd: Tehnicki Fakultet, 2005.
- [82] H. Pozar, *Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima, Prvi svezak*. Zagreb : Informator, 1983.
- [83] H. Pozar, *Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima, Drugi svezak*. Zagreb : Informator, 1983.
- [84] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, G.B. Sheblé, *Power generation, operation, and control, 3rd Edition*. John Wiley, 2014.
- [85] M. Sathyajith, *Wind Energy, Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer, 2006.
- [86] F. D. Bianchi, H. De Battista, R. J. Mantz, *Wind Turbine Control Systems*, Springer Science & Business Media, 2006.
- [87] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*. John Wiley & Sons, 2007.
- [88] N. A. M. Iqbal, S. A. Halim, N. Ali, “Estimating Weibull Parameters Using Maximum Likelihood Estimation and Ordinary Least Squares: Simulation Study and Application on Meteorological Data,” *Mathematics and Statistics*, vol. 10, no. 2, pp. 269 - 292, 2022.
- [89] F. Bilendo, A. Meyer, H. Badihi, N. Lu, P. Cambron, B. Jiang, “Applications and Modeling Techniques of Wind Turbine Power Curve for Wind Farms—A Review,” *Energies*, vol. 16, no. 1, 180, 2023.
- [90] R. Billinton, W. Li, *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*. Springer, 1994.
- [91] C. Graham, D. Talay, *Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods, Mathematical Foundations of Stochastic Simulation*. Springer, 2013.
- [92] N. T. Thomopoulos, *Essentials of Monte Carlo Simulation, Statistical Methods for Building Simulation Models*. Springer, 2013.
- [93] F. Greselin, F. Piacenza, R. Zitakis, “Practice Oriented and Monte Carlo Based Estimation of the Value-at-Risk for Operational Risk Measurement,” *Risks*, vol. 7, no. 2, 50, 2019.
- [94] S. Sadović, *Analiza elektroenergetskih sistema*. Sarajevo: Elektrotehnički fakultet, 2011.

- [95] I. Pavić, M. Delimar, B. Filipović-Grčić, I. Damjanović, *Numerički postupci u elektroenergetici- Proračun tokova snaga, Predavanja*. Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2019/2020.
- [96] T. K. Nagsarkar, M. S. Sukhija, *Power System Analysis, second edition*. Oxford University Press, 2014.
- [97] J. Zhu, *Optimization of power system operation, Second Edition*. USA: IEEE Press, John Wiley & Sons, 2015.
- [98] N. Dizdarevic, *Stabilnost vjetroelektrane*, Zagreb, Hrvatska: Energetski institut 'Hrvoje Požar'.
- [99] P. Kumar, A. K. Singh, *Load Flow Analysis with Wind Farms*. Springer, 2017.
- [100] J. M. Chapallaz, J. D. Ghali, P. Eichenberger, G. Fischer, *Manual on induction motors used as generators: A publication of deutsches zentrum für entwicklungstechnologien GATE a division of the deutsche gesellschaft für technische zusammenarbeit (GTZ) GmbH*. USA: John Wiley, 2013.
- [101] J. Nocedal, S. Wright, *Numerical Optimization*. New York: Springer-Verlag, 2006.
- [102] F. Rothlauf, *Design of Modern Heuristics Principles and Application*. Berlin: Springer-Verlag, 2011.
- [103] S. Krcevinac, M. Cangalovic, V. Kovacevic-Vujcic, M. Martić, M. Vujošević, *Operaciona istraživanja I. FON*, 2006.
- [104] Z. Michalewicz, M. Schoenauer, "Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems," *Evolutionary Computation*, vol. 4, no. 1, pp. 1-32, 1996.
- [105] K. Deb, "An efficient constraint-handling method for genetic algorithms," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 186, no. 2-4, pp. 311-338, 2000.
- [106] C. A. C. Coello, "Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art," *Information Fusion*, vol. 191, no. 11-12, pp. 1245-1282, January 2002.
- [107] E. Mezura-Montes, C. A. C. Coello, "Constraint-handling in nature-inspired numerical optimization: Past, present and future," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 4, pp. 173-194, 2011.
- [108] E. Mezura-Montes, C. A. C. Coello, "Constraint-handling in nature-inspired numerical optimization: Past, present and future," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 173-194, 2011.
- [109] T. Runarsson, X. Yao, "Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 4, no. 3, pp. 284-294, 2000.
- [110] S. Koziel, Z. Michalewicz, "Evolutionary algorithms, homomorphous mappings, and constrained parameter optimization," *Evolutionary Computation*, vol. 7, no. 1, pp. 19-44, 1999.
- [111] R. T. Marler, J. S. Arora, "The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 41, no. 6, pp. 853-862, 2010.
- [112] L. Ma, H. Chen, K. Hu, Y. Zhu, "Hierarchical artificial bee colony algorithm for RFID network planning optimization," *The Scientific World Journal*, vol. 21, pp. 1-21, 2014.
- [113] M. Caramia, P. Dell'Olmo, *Multi-objective Management in Freight Logistics*. London: Springer-Verlag, 2008.

- [114] S.Arora, B.Barak, "Computational Complexity: A Modern Approach," *Cambridge University Press*, vol. 1, 2009.
- [115] X.S. Yang, "Swarm intelligence based algorithms: A critical analysis," *Evolutionary Intelligence*, vol. 7, pp. 17-28, 2014.
- [116] D. Ogan, M. Azizoglu, "A branch and bound method for the line balancing problem in u-shaped assembly lines with equipment requirements," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 36, pp. 46-54, 2015.
- [117] R. Yokoyama, Y. Shinano, S. Taniguchi, M. Ohkura, T. Wakui, "Optimization of energy supply systems by milp branch and bound method in consideration of hierarchical relationship between design and operation," *Energy Conversion and Management*, vol. 92, pp. 92-104, 2015.
- [118] S. Koziel, X.S. Yang, *Computational Optimization, Methods and Algorithms*. Berlin:Springer, 2011.
- [119] R. Martini, G. Reinelt, *The Linear Ordering Problem Exact and Heuristic Methods in Combinatorial Optimization*. Berlin:Springer-Verlag, 2011.
- [120] E. G. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*. New Jersey:John Wiley, 2009.
- [121] K. E. Train, W. W. Wilson, "Monte carlo analysis of SP-off-RP data," *Journal of Choice Modelling*, vol. 2, no. 1, pp. 101-117, 2009.
- [122] C. Matthews, L. Wright, X. S. Yang, *Sensitivity analysis, optimization, and sampling methods applied to continuous models*. Report, National Physical Laboratory, 2009.
- [123] F. Glover, C. McMillan, "Efficient evaluation of Green's functions for lossy half-space problems," *Computers and Operations Research*, vol. 13, no. 5, pp. 563-573, 1986.
- [124] R. Storn, K. Price, "Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces," *Journal of Global Optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341-359, 1997.
- [125] K. V. Price, R. M. Storn, J. A. Lampinen, *Differential Evolution A Practical Approach to Global Optimization*. Berlin:Springer, 2005.
- [126] I. Boussaid, J. Lepagnot, P. Siarry, "A survey on optimization metaheuristics," *Information Sciences*, vol. 237, pp. 82-117, 2013.
- [127] N. Mladenovic, P. Hansen, "Variable neighborhood search," *Journal of Computers and Operations Research*, vol. 24, no. 11, pp. 1097-1100, 1997.
- [128] F. Glover, "Heuristics for integer programming using surrogate constraints," *Decision Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 156-166, January 1977.
- [129] C. Darwin, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life, First Edition*. London:John Murray, 1859.
- [130] K. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science Magazine*, vol. 220, no. 4598, pp. 671- 680, 1983.
- [131] X. S. Yang, *Introduction to Mathematical Optimization: From Linear Programming to Metaheuristics*. Cambridge:Cambridge International Science Publishing, 2008.
- [132] S.N.Sivanandam, S.N.Deepa, *Introduction to Genetic Algorithms*. Springer, 2008.
- [133] K. L. Du, M.N.S. Swamy, *Search and Optimization by Metaheuristics Techniques and Algorithms Inspired by Nature*. Springer, 2016.
- [134] K. Deb, *Optimization for Engineering Design Algorithms and Examples, second edition*. Kanpur: Indian Institute of Technology, 2012.

- 
- [135] Z.M.Varga, *Metaheuristic*, Belgrade: University of Belgrade, 2008.
- [136] D.E.Goldberg, *Genetic algorithm in search, optimization, and machine learning*, Boston: Addison Wesley Publishing Company, 1989.
- [137] O. Kramer, *Genetic Algorithm Essentials*. Springer, 2017.
- [138] Z. Michalewicz, "Genetic algorithms, numerical optimization and constraints, in: L.J. Eshelmen (Ed.)," 6th International Conference on Genetic Algorithms, pp. 151–158, 1995.
- [139] K. Deep, M. Thakur, "A new crossover operator for real coded genetic algorithms," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 188, no. 1, pp. 895-911, 2007.
- [140] R. Mallipeddi, P. N. Suganthan, "Ensemble of constraint handling techniques," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 14, no. 4, pp. 561-579, 2010.
- [141] T. P. Runarsson, X. Yao, "Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization," *IEEE Trans. on evolutionary computation*, vol. 4, no. 3, pp. 284-294, 2000.
- [142] S. A. Soliman, A. H. Mantawy, *Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems*. Springer, 2012.
- [143] World energy council, *2010 Survey of energy resources*. 2010.
- [144] W. Ongsakul, D. N. Vo, *Artificial Intelligence in Power System Optimization*. CRC Press, 2013.
- [145] S. Khunkitti, N. R. Watson, R. Chatthaworn, S. Premrudeepreechacharn, A. Siritaratiwat, "An Improved DA-PSO Optimization Approach for Unit Commitment Problem," *Energies*, vol. 12, no. 12, 2335, 2019.
- [146] V. K. Kamboj, "A novel hybrid PSO–GWO approach for unit commitment problem," *Neural Computing and Applications*, vol. 27, pp. 1643–1655, 2016.
- [147] M. Basu, "Artificial immune system for fixed head hydrothermal power system," *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 606-612, 2011.
- [148] T. T. Nguyen, D. N. Vo, A. V. Truong, L. D. Ho, "Meta-Heuristic Algorithms for Solving Hydrothermal System Scheduling Problem Considering Constraints in Transmission Lines," *Glob. J. Technol. Optim.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–6, 2016.
- [149] IEEE 30-Bus System, Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG), University of Illinois, Urbana. [Online]. Available: <https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-30-bus-system/>.
- [150] Ali R. Al-Roomi, Power Flow Test Systems Repository, Dalhousie University, Electrical and Computer Engineering, University of Illinois, Halifax, Nova Scotia, Canada. [Online]. Available: <https://al-roomi.org/power-flow/30-bus-system>.
- [151] M. Singh, S. Santoso, *Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants*. Austin, Texas: The University of Texas, 2011.

## **БИОГРАФИЈА**

Борче Постолов е роден на 11. 8. 1993 година во Штип. Во 2012 година дипломирал во Средното електротехничко училиште „Коле Нехтенин“ во Штип, насока компјутерска техника и автоматика. Во 2012 година се запишал на Електротехничкиот факултет на Универзитетот „Гоце Делчев“ во Штип, а дипломирал во 2016 година од областа Обновливи извори на енергија, со просечна оценка 9,65. Дипломската работа под менторство на проф. д-р Влатко Чинговски со тема: „Споредба на работните карактеристики на двострано напојуван асинхронен генератор и класичен асинхронен генератор при исти услови на работа“ ја одбрал со оценка 10 (десет). Од страна на Универзитетот „Гоце Делчев“ во Штип е прогласен за најдобар дипломец на генерацијата на Електротехничкиот факултет, кој во студиската 2015/2016 година дипломирал со највисок среден успех на Електротехничкиот факултет. На 17.5.2017 година се стекнал со Благодарница од страна на Министерот за образование и наука на Република Македонија за постигнатиот особен успех на додипломски студии, со којашто бил прогласен за најдобар студент во својата област за студиската 2015/2016 година.

Веднаш по завршувањето на редовните студии, се запишал на постдипломски магистерски студии на Факултетот за електротехника и информациски технологии на Универзитетот „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, на студиската програма Електроенергетика, што ги завршил со просечна оценка од 10,00. Во 2018 година го одбрал магистерскиот труд „Влијание на заземјувањето на ѕвездиштето во среднонапонските 35 kV разводни постројки врз големината на струјата на куса врска“ под менторство на проф. д-р Атанас Илиев, со оценка 10 (десет).

По завршувањето на магистерските студии се запишал на докторски студија на Факултетот за електротехника и информациски технологии на Универзитетот „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, на студиската програма Електротехника и информациски технологии, потпрограма Електроенергетика, односно потесна област на истражување Електрични центри и разводни постројки. Сите испити за докторските студии ги положил со просечна оценка 10,00.

Областите со кои се занимава Борче Постолов во својата научно-истражувачка работа се: развој на оптимизациони методи во електроенергетиката, проектирање и моделирање електрични центри и разводни постројки, експлоатација на електроенергетските системи, планирање на електроенергетските системи, обновливи извори на енергија, како и преносни и дистрибутивни системи.