



Univerzitet u Nišu  
Mašinski fakultet u Nišu



**Mirko M. Stojiljković**

**VIŠEKRITERIJUMSKA OPTIMIZACIJA  
SISTEMA TRIGENERACIJE ENERGIJE**

— doktorska disertacija —

Niš, 2015.





University of Niš  
Faculty of Mechanical Engineering in Niš



**Mirko M. Stojiljković**

**MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF  
TRIGENERATION ENERGY SYSTEMS**

— doctoral dissertation —

Niš, 2015.



# Podaci o mentoru i članovima Komisije

## Mentor

**Dr Bratislav Blagojević**, redovni profesor  
Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu  
Uža naučna oblast: Termotehnika, termoenergetika i procesna tehnika

## Članovi Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije

**Dr Dušan Gvozdenac**, redovni profesor  
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka  
Termoenergetika i energetska menadžment

**Dr Branislav Stojanović**, redovni profesor  
Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu  
Termotehnika, termoenergetika i procesna tehnika

**Dr Dejan Mitrović**, docent  
Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu  
Termotehnika, termoenergetika i procesna tehnika

**Dr Rade Karamarković**, docent  
Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu Univerziteta u Kragujevcu  
Toplotna tehnika i zaštita životne sredine

## Datum odbrane doktorske disertacije

02.10.2015.



# VIŠEKRITERIJUMSKA OPTIMIZACIJA SISTEMA TRIGENERACIJE ENERGIJE

## Rezime

Visoko efikasni sistemi sa kogeneracijom električne i toplotne energije su važni za obezbeđenje pouzdanog, održivog i finansijski prihvatljivog snabdevanja energijom, kao i za povećanje energetske efikasnosti i smanjenje štetnog uticaja energetskog sektora na okolinu. Fleksibilni sistemi manjih i srednjih snaga su pogodni za energetske snabdevanje zgrada — značajnih potrošača energije na globalnom nivou. Efikasnost sistema sa kogeneracijom se može povećati korišćenjem proizvedene električne ili toplotne energije za hlađenje, tj. trigeneracijom, ali i upotrebom toplih ili hladnih akumulatora energije.

Optimizacija strukture kompleksnih energetskih postrojenja, kao i projektnih i radnih parametara njihovih komponenata, je važna za obezbeđenje finansijske i ekonomske prihvatljivosti energetski i ekološki povoljnih rešenja. Iz istog razloga je važna optimizacija pri planiranju rada postojećih postrojenja. Višekriterijumska optimizacija se koristi za pronalaženje što kvalitetnijih kompromisa između različitih i često suprotstavljenih ciljeva — finansijskih, energetskih i ekoloških. Optimizacija energetskih sistema se može koristiti za definisanje mera energetske politike. Tada mogu biti relevantni problemi optimizacije sa dva ili više nivoa koji su u literaturi malo zastupljeni.

U ovoj doktorskoj disertaciji je predstavljena metodologija optimizacije radnih parametara energetskih sistema sa trigeneracijom i skladištenjem toplotne energije. Metodologija se zasniva na detaljnom matematičkom modelu koji predstavlja sintezu dosadašnjih znanja iz ove oblasti i donosi poboljšanja — više detalja uzetih u obzir kroz ulazne parametre, precizniji matematički opis komponenata i uopšteniji model procesa puštanja u rad. Definisani problem optimizacije je moguće rešiti kombinacijom metaheurističkih metoda i linearnog programiranja ili transformisati i koristiti mešovito celobrojno linearno programiranje. Danas je drugi pristup daleko efikasniji i pouzdaniji od prvog. Posmatrani vremenski period od jedne ili više godina može biti aproksimiran tipičnim perioda (npr. danima) ili analiziran u celini. Za drugi slučaj je predložen pristup koji podrazumeva niz procedura kratkoročne optimizacije sa pokretnim periodom.

Pomenuta metodologija optimizacije radnih režima i odgovarajući matematički model se mogu koristiti kao sastavni deo predloženog pristupa optimizaciji strukture

postrojenja i projektnih parametara komponenata, koji se zasniva na strukturalnoj dekompoziciji problema. Na nivou strukture i projektnih parametara definisan je diskretni kombinatorički problem optimizacije za čije rešavanje se koriste metaheurističke metode — genetski algoritam, optimizacija rojevima čestica, simulirano kaljenje i tabu pretraga. Na nižem nivou je rešavan problem optimizacije radnog režima mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem, pošto je zaključeno da je alternativni pristup manje efikasan i pouzdan. Posebna pažnja posvećena je razmatranjima mogućnosti zadovoljenja projektnih, tj. ekstremnih zahteva korisnika.

Definisani pristup optimizaciji je ilustrovan na primeru izbora postrojenja za energetska snabdevanje stambenog naselja u Nišu. Potrebe korisnika za električnom energijom, grejanjem i hlađenjem su definisane kombinovanjem rezultata merenja potrošnje energije i energetske simulacije razmatranih zgrada. Problem višekriterijumske optimizacije sa dva nivoa rešavan je strukturalnom dekompozicijom. Funkcije cilja prilikom izbora komponenata su ukupni godišnji troškovi, potrošnja primarne energije i emisija gasova sa efektom staklene bašte. Pretpostavljen je rad postrojenja u finansijski optimalnom režimu. Sve metaheurističke metode su rezultirale istim rešenjima. Za slučajeve u kojima problem optimizacije ima jedan nivo, identična rešenja su dobijena i alternativnim, često primenjivanim pristupom — redukcijom nadstrukture postrojenja mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem. Osim pogodnosti pristupa na bazi strukturalne dekompozicije, prikazan je i potencijal ređe korišćenih metaheurističkih metoda. Pored toga, pokazano je da, pod razmatranim uslovima, optimizacija radnih režima za period od jedne godine na bazi pokretnog perioda optimizacije daje veoma slične rezultate kao i kada se vrši optimizacija za celu godinu odjednom. Analizirana su ograničenja ovog pristupa.

Rešenja problema višekriterijumske optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara dobijena su metodom  $\varepsilon$ -ograničenja u formi Pareto skupa. Zaključeno je da vrednosti ukupnih troškova, potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte mogu značajno varirati u zavisnosti od izbora funkcije cilja i biti znatno lošije od procenjenog potencijala kada je potrebno naći kompromis. Optimizacijom radnih režima je pokazano da nekada smanjenje potreba korisnika za grejanjem i hlađenjem može za posledicu imati povećanje emisije gasova sa efektom staklene bašte kada su u pitanju postrojenja za snabdevanje energijom sa kogeneracijom i trigeneracijom.

Rezultati pokazuju značajnu osetljivost optimalnih rešenja na promene cena energenata, faktora konverzije i potreba korisnika, pa su mogućnosti za generalizaciju u vezi samih rešenja problema optimizacije ograničene na slične uslove. Predložena metodologija optimizacije je, sa druge strane, veoma uopštena i može se koristiti za drugačije uslove, tipove korisnika i postrojenja sa komponentama koje ovde nisu razmatrane.

## **Ključne reči**

Primarna energija; kogeneracija; trigeneracija; akumulator energije; snabdevanje zgrada energijom; projektni uslovi; višekriterijumska optimizacija; mešovito celobrojno linearno programiranje; metaheurističke metode; strukturna dekompozicija.

## **Naučna oblast**

Tehničko-tehnološke nauke

## **Uža naučna oblast**

Termotehnika, termoenergetika i procesna tehnika

## **UDK broj i klasifikaciona oznaka naučne oblasti**

620.97 : 621.4/.5] : 519.852 (043.3)

697.31 : 536.7] : 662.99 (043.3)

T200



# MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF TRIGENERATION ENERGY SYSTEMS

## Abstract

High-efficiency energy systems with cogeneration of electricity and heat are important for providing reliable, sustainable and financially acceptable energy supply, as well as for increasing energy efficiency and reducing the harmful environmental impact of the energy sector. Low- and medium-size flexible systems are suitable for supplying energy to buildings — significant energy consumers on the global level. Cogeneration systems efficiency can be improved by exploiting generated electricity or heat for refrigeration, *i.e.* with trigeneration, but also by using heat and cool storage.

The optimization of complex energy plants structure, as well as of the design and operation parameters of their components, is important for securing financial and economic acceptability of good solutions from the energy and environment perspectives. For the same reason, optimization is important when planning the operation of existing plants. Multi-criteria optimization is used to find high-quality compromises between different, often conflicting objectives — financial, energy and environmental. Energy systems optimization can be used to define energy policy measures. In such a case, two- or multi-level optimization problems, which are rarely applied in the literature, might be relevant.

This doctoral dissertation presents the methodology for the operation optimization of the energy systems with trigeneration and thermal energy storage. The methodology is based on the detailed mathematical model which represents the synthesis of current knowledge from this field and introduces certain improvements — more details considered through input parameters, a more precise mathematical description of components, and a more general start-up process model. The defined optimization problem might be solved by combining metaheuristic methods and linear programming or by applying transformations and using mixed integer linear programming. Today, the latter approach is far more efficient and reliable than the first one. The observed period of one or more years might be approximated with typical periods (*e.g.* days) or analyzed in its entirety. For the latter case, the proposed approach assumes the array of short-term-optimization procedures with a moving horizon.

The above operation optimization methodology and the related mathematical model can

be used as a segment of the suggested approach to the optimization of plant structure and components design parameters, based on the structural decomposition of the problem. On the structure-and-design level, the discrete combinatorial optimization problem is defined and solved using metaheuristic methods — genetic algorithm, particle swarm optimization, simulated annealing and tabu search. On a lower level, the operation optimization problem is solved with mixed integer linear programming, since the alternative approach is found to be less efficient and reliable. Special attention is dedicated to the considerations related to consumers' design, *i.e.* extreme requirements.

The defined optimization approach is illustrated on the example of choosing the plant for energy supply of a residential settlement in Niš. Consumers' requirements for electricity, heating and cooling are defined combining the results of energy consumption measurements and the energy simulations of the observed buildings. The multi-objective bi-level optimization problem is solved using structural decomposition. When choosing components, the objectives were annual total costs, primary energy consumption and greenhouse gases emission. Financially optimal operation regimes are assumed. All metaheuristic methods resulted with the same solutions. For the cases with single-level optimization problems, the identical solutions are obtained using the alternative, often applied approach — plant superstructure reduction with mixed integer linear programming. Except the suitability of the structural-decomposition-based approach, the potential of rarely used metaheuristic methods is demonstrated as well. Furthermore, it is shown that, under the considered conditions, the moving-horizon operation optimization for one-year period yields very similar results to those obtained performing the optimization for the entire year at once. The limitations of this approach are analyzed.

The solutions of the multi-objective structure, design and operation optimization problem are obtained with the  $\varepsilon$ -constraint method as a Pareto set. It is concluded that the values of total costs, primary energy consumption and greenhouse gases emission might significantly vary depending on the choice of the objective function and be notably worse than the estimated potential when a compromise is required. Operation optimization shows that sometimes the reduction of the consumers' requirements for heating and cooling might yield an increase in greenhouse gases emission as a consequence in the cases of the energy supply plants with cogeneration and trigeneration.

The results illustrate a significant sensitivity of the optimal solutions to the changes in the prices of energy commodities, conversion factors and consumers' needs, thus the generalization potential of the obtained solutions to the optimization problem is limited to the similar conditions. The proposed optimization methodology is, on the other hand, very general and might be used for different conditions, types of users and plants with components not considered here.

## **Key words**

Primary energy; cogeneration; trigeneration; energy storage; buildings energy supply; design conditions; multi-criteria optimization; mixed integer linear programming; metaheuristic methods; structural decomposition.

## **Scientific field**

Engineering sciences and technology

## **Specialized scientific field**

Thermal engineering, thermoenergetics and process engineering

## **UDC number and classification label of scientific field**

620.97 : 621.4/.5] : 519.852 (043.3)

697.31 : 536.7] : 662.99 (043.3)

T200



# Sadržaj

<b>Sadržaj</b>	<b>i</b>
<b>Spisak tabela</b>	<b>v</b>
<b>Spisak slika</b>	<b>vii</b>
<b>Lista oznaka</b>	<b>xi</b>
Latinični simboli . . . . .	xi
Grčki simboli . . . . .	xii
Gornji indeksi . . . . .	xii
Donji indeksi . . . . .	xiii
<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Stanje problema</b>	<b>7</b>
2.1. Kogeneracija toplotne i električne energije . . . . .	7
2.1.1. Sistemi kogeneracije sa klipnim motorima sa unutrašnjim sagorevanjem . . . . .	9
2.1.2. Sistemi kogeneracije sa gasnim turbinama . . . . .	13
2.1.3. Poređenje sistema kogeneracije sa klipnim motorima i gasnim turbinama . . . . .	15
2.2. Trigeneracija . . . . .	16
2.3. Skladištenje toplotne energije . . . . .	19
2.4. Radni režimi sistema kogeneracije i trigeneracije . . . . .	22
2.5. Energetski i ekološki aspekti korišćenja sistema sa kogeneracijom . . . . .	24
2.6. Matematičko modeliranje i optimizacija sistema trigeneracije . . . . .	26
2.7. Pregled literature . . . . .	27
2.7.1. Sistemi kogeneracije i trigeneracije . . . . .	27
2.7.2. Energetske simulacije zgrada . . . . .	29
2.7.3. Optimizacija energetskih sistema . . . . .	31
2.7.3.1. Izbor kriterijuma optimizacije . . . . .	31
2.7.3.2. Optimizacija radnih parametara . . . . .	33
2.7.3.3. Optimizacija strukture i projektnih parametara . . . . .	46
2.7.3.4. Stohastički problemi optimizacije . . . . .	57
2.7.3.5. Pristup zasnovan na fazi matematičkom programiranju . . . . .	58
2.7.4. Trendovi i moguća poboljšanja . . . . .	65

<b>3. Pristup problemu</b>	<b>69</b>
3.1. Opis postrojenja za snabdevanje energijom . . . . .	69
3.1.1. Struktura postrojenja . . . . .	69
3.1.2. Tokovi energije i komponente . . . . .	70
3.2. Vremenski okvir . . . . .	72
3.3. Matematički model . . . . .	73
3.3.1. Matematički modeli komponenata . . . . .	74
3.3.1.1. Nezavisno promenljive veličine i osnovna ograničenja . . . . .	75
3.3.1.2. Stacionaran rad komponenata . . . . .	77
3.3.1.3. Linearna aproksimacija nelinearnih funkcija . . . . .	77
3.3.1.4. Puštanje u rad i zaustavljanje komponenata . . . . .	81
3.3.1.5. Ostala ograničenja . . . . .	83
3.3.1.6. Troškovi rada i održavanja . . . . .	84
3.3.1.7. Komponente za kogeneraciju . . . . .	85
3.3.1.8. Veza sa mrežom za distribuciju električne energije . . . . .	89
3.3.1.9. Kotlovi . . . . .	91
3.3.1.10. Komponente za hlađenje . . . . .	92
3.3.1.11. Akumulatori toplotne energije . . . . .	94
3.3.2. Sinteza matematičkih modela komponenata . . . . .	99
3.3.2.1. Zadovoljenje potreba korisnika . . . . .	100
3.3.2.2. Finansijski i ekonomski indikatori . . . . .	101
3.3.2.3. Primarna energija . . . . .	102
3.3.2.4. Emisija gasova sa efektom staklene bašte . . . . .	102
3.3.2.5. Zadovoljenje projektnih zahteva . . . . .	103
3.3.2.6. Zakonska ograničenja . . . . .	104
3.4. Formulacija problema optimizacije . . . . .	105
3.4.1. Ulazni parametri . . . . .	106
3.4.2. Nezavisno promenljive veličine . . . . .	107
3.4.3. Zavisne veličine . . . . .	108
3.4.4. Ograničenja . . . . .	111
3.4.5. Funkcije cilja . . . . .	114
3.4.5.1. Finansijske i ekonomske funkcije cilja . . . . .	114
3.4.5.2. Ostale funkcije cilja . . . . .	116
3.4.6. Klasična formulacija problema višekriterijumske optimizacije . . . . .	118
3.4.7. Fazi formulacija problema višekriterijumske optimizacije . . . . .	120
3.4.8. Problemi sa dva nivoa optimizacije . . . . .	123
3.4.9. Izlazne veličine . . . . .	123
3.5. Rešavanje problema optimizacije . . . . .	124
3.5.1. Optimizacija radnog režima . . . . .	124

3.5.1.1.	Koncept zasnovan na aproksimaciji razmatranog perioda	125
3.5.1.2.	Koncept zasnovan na pokretnom periodu optimizacije	129
3.5.2.	Optimizacija strukture i projektnih parametara	133
3.5.3.	Povećanje efikasnosti rešavanja problema	138
3.5.4.	Softversko rešenje za optimizaciju sistema za snabdevanje energijom	139
<b>4.</b>	<b>Primena predložene metodologije</b>	<b>143</b>
4.1.	Procena energetske potrebe korisnika	143
4.2.	Ostali ulazni podaci	145
4.3.	Struktura sistema za snabdevanje energijom	145
4.4.	Funkcije cilja	147
4.5.	Pristup optimizaciji energetskog sistema	147
<b>5.</b>	<b>Analiza rezultata</b>	<b>149</b>
5.1.	Primer 1 — Optimizacija strukture, projektnih i radnih parametara	149
5.1.1.	Energetske potrebe korisnika	149
5.1.2.	Metodologija optimizacije	150
5.1.3.	Višekriterijumska optimizacija	154
5.1.3.1.	Optimalna rešenja	154
5.1.3.2.	Radni režimi sistema za snabdevanje energijom	157
5.1.3.3.	Mogućnosti smanjenja potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte	159
5.1.4.	Analiza osetljivosti	160
5.1.4.1.	Cena goriva	161
5.1.4.2.	Cena preuzete električne energije	162
5.1.4.3.	Cena isporučene električne energije	163
5.1.5.	Optimizacija kao sredstvo definisanja energetske politike	164
5.2.	Primer 2 — Optimizacija radnog režima	166
5.2.1.	Analiza preciznosti i efikasnosti	168
5.2.2.	Analiza kriterijuma optimizacije	169
5.2.3.	Analiza osetljivosti	172
5.2.3.1.	Cena goriva	172
5.2.3.2.	Cena preuzete električne energije	175
5.2.3.3.	Cena isporučene električne energije	177
5.2.3.4.	Faktori konverzije	180
5.2.3.5.	Potražnja energije	185
<b>6.</b>	<b>Zaključci</b>	<b>189</b>

<b>Reference</b>	<b>197</b>
<b>Biografija autora</b>	<b>211</b>

# Spisak tabela

3.1.	Osnovne nezavisno promenljive veličine problema optimizacije radnog režima	109
3.2.	Najvažnije zavisne veličine za jedinice za kogeneraciju, transformatore električne energije i kotlove . . . . .	110
3.3.	Najvažnije zavisne veličine za komponente za hlađenje . . . . .	111
3.4.	Najvažnije zavisne veličine za akumulatore toplotne energije . . . . .	112
3.5.	Najvažnije zavisne veličine koje povezuju više komponentata . . . . .	112
4.1.	Nezavisno promenljive veličine strukture postrojenja i projektnih parametara komponentata . . . . .	146
5.1.	Podaci o tipičnim danima . . . . .	151
5.2.	Pareto optimalna rešenja optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara sistema za snabdevanje energijom . . . . .	156
5.3.	Rezime parametara procedure i rezultata optimizacije radnog režima . . . . .	167



# Spisak slika

2.1. Pojednostavljena šema sistema kogeneracije sa akumulatorom toplotne energije i dodatnim kotlom . . . . .	8
2.2. Pojednostavljena šema motora sa unutrašnjim sagorevanjem sa izmenjivačima toplote, generatorom i transformatorom električne energije . .	11
2.3. Primer radnih karakteristika gasnog motora sa generatorom pri parcijalnim opterećenjima . . . . .	11
2.4. Primer zavisnosti električne snage motora sa generatorom od temperature i pritiska vazduha (odnosno nadmorske visine) . . . . .	12
2.5. Primer zavisnosti toplotne snage motora sa generatorom pri maksimalnom opterećenju od temperature i pritiska vazduha (odnosno nadmorske visine) .	12
2.6. Pojednostavljena šema kogenerativnog postrojenja sa gasnom turbinom koje radi u otvorenom ciklusu . . . . .	13
2.7. Primer radnih karakteristika sistema sa gasnom turbinom i generatorom pri parcijalnim opterećenjima . . . . .	14
2.8. Primer zavisnosti električne snage i efikasnosti sistema sa gasnom turbinom i generatorom pri maksimalnom kontinualnom opterećenju od temperature vazduha na ulazu . . . . .	14
2.9. Primer radnih karakteristika jednostepene apsorpcione rashladne mašine . .	17
2.10. Primer zavisnosti dovedene toplotne snage i dobijene rashladne snage kod jednostepene apsorpcione rashladne mašine . . . . .	17
2.11. Primer zavisnosti rashladnog kapaciteta jednostepene apsorpcione rashladne mašine od temperatura hlađene i rashladne vode . . . . .	18
2.12. Zavisnost kapaciteta i temperature toplog fluida na izlazu jednostepene apsorpcione rashladne mašine od temperature toplog fluida na ulazu . . . . .	18
2.13. Tipičan profil temperature vode unutar stratifikovanog hladnog akumulatora toplotne energije . . . . .	21
2.14. Tipični profili temperature vode na ulazu i izlazu iz hladnog akumulatora toplotne energije . . . . .	21
3.1. Komponente i tokovi energije postrojenja za trigeneraciju . . . . .	70
4.1. 3-D model analiziranog naselja . . . . .	143
4.2. Poređenje izmerene i simulirane mesečne potrebe za grejanjem razmatranog naselja . . . . .	144
5.1. Profili energetske potrebe korisnika za projektne dane . . . . .	149

5.2.	Profili energetske potrebe korisnika za tipične dane . . . . .	150
5.3.	Konvergencija ka finansijski optimalnom rešenju problema optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara sistema za snabdevanje energijom korišćenjem strukturne dekompozicije i metaheurističkih metoda . . . . .	152
5.4.	Pareto optimalna rešenja dobijena metodom $\varepsilon$ -ograničenja, primenom strukturne dekompozicije i metaheurističkih metoda, kao i pristupa na bazi nadstrukture i mešovito celobrojnog linearnog programiranja, kada su funkcije cilja ukupni godišnji troškovi i godišnja potrošnja primarne energije .	155
5.5.	Pareto optimalna rešenja dobijena metodom $\varepsilon$ -ograničenja, primenom strukturne dekompozicije i metaheurističkih metoda, kao i pristupa na bazi nadstrukture i mešovito celobrojnog linearnog programiranja, kada su funkcije cilja ukupni godišnji troškovi i godišnja emisija gasova sa efektom staklene bašte . . . . .	155
5.6.	Finansijski optimalno zadovoljenje potrebe korisnika za grejanjem . . . . .	158
5.7.	Finansijski optimalno zadovoljenje potrebe korisnika za hlađenjem . . . . .	158
5.8.	Zavisnost optimalne strukture i projektnih parametara postrojenja, kao i ukupnih godišnjih troškova od cene goriva . . . . .	161
5.9.	Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte od cene goriva . . . . .	161
5.10.	Zavisnost optimalne strukture i projektnih parametara postrojenja, kao i ukupnih godišnjih troškova od cene preuzete električne energije . . . . .	162
5.11.	Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte od cene preuzete električne energije . . . . .	162
5.12.	Zavisnost optimalne strukture i projektnih parametara postrojenja, kao i ukupnih godišnjih troškova od cene isporučene električne energije . . . . .	164
5.13.	Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte od cene isporučene električne energije . . . . .	164
5.14.	Potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem za period od jedne godine . . . . .	166
5.15.	Zavisnost emisije gasova sa efektom staklene bašte od dodatne cene emisije .	170
5.16.	Zavisnost varijabilnih troškova i potrošnje primarne energije od dodatne cene emisije . . . . .	170
5.17.	Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od dodatne cene emisije . . . . .	171
5.18.	Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od dodatne cene emisije . . . . .	171
5.19.	Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od dodatne cene emisije . . . . .	171
5.20.	Zavisnost varijabilnih troškova od cene goriva . . . . .	173

## Spisak slika

5.21. Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte od cene goriva . . . . .	173
5.22. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od cene goriva . . . . .	174
5.23. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od cene goriva . . . . .	174
5.24. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od cene goriva . . . . .	174
5.25. Zavisnost varijabilnih troškova od cene preuzete električne energije . . . . .	175
5.26. Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte od cene preuzete električne energije . . . . .	175
5.27. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od cene preuzete električne energije . . . . .	176
5.28. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od cene preuzete električne energije . . . . .	176
5.29. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od cene preuzete električne energije . . . . .	176
5.30. Zavisnost varijabilnih troškova od cene isporučene električne energije . . . . .	178
5.31. Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte od cene preuzete električne energije . . . . .	178
5.32. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od cene isporučene električne energije . . . . .	179
5.33. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od cene isporučene električne energije . . . . .	179
5.34. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od cene isporučene električne energije . . . . .	179
5.35. Zavisnost potrošnje primarne energije od faktora konverzije električne energije u primarnu . . . . .	180
5.36. Zavisnost varijabilnih troškova i emisije gasova sa efektom staklene bašte od cene preuzete električne energije . . . . .	180
5.37. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od faktora konverzije električne energije u primarnu . . . . .	181
5.38. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od faktora konverzije električne energije u primarnu . . . . .	181
5.39. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od faktora konverzije električne energije u primarnu . . . . .	181
5.40. Zavisnost emisije gasova sa efektom staklene bašte od faktora konverzije električne energije u emisiju . . . . .	183

5.41. Zavisnost varijabilnih troškova i potrošnje primarne energije od faktora konverzije električne energije u emisiju . . . . .	183
5.42. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od faktora konverzije električne energije u emisiju . . . . .	184
5.43. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od faktora konverzije električne energije u emisiju . . . . .	184
5.44. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od faktora konverzije električne energije u emisiju . . . . .	184
5.45. Zavisnost varijabilnih troškova od potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem	185
5.46. Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte od potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem . . . . .	185
5.47. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem . . . . .	186
5.48. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem . . . . .	186
5.49. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem . . . . .	186

# Lista oznaka

## Latinični simboli

$A$	Površina, [m <sup>2</sup> ],
$a$	Koeficijent linearne regresije, [–]
$b$	Koeficijent linearne regresije, [kW] ili [kWh]
BCR	Odnos dobiti i troškova, [–]
$c$	Specifični toplotni kapacitet, [kWh kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
CRF	Faktor povraćaja kapitala, [–]
$E$	Energija, [kWh]
$f$	Opšta funkcija nezavisno promenljivih veličina
IRR	Interna stopa povraćaja, [–]
$M$	Model komponente, [–]
$m$	Masa, [kg]
$n$	Broj nezavisno promenljivih veličina, vremenskih koraka, komponenata, tipičnih perioda, itd, [–]
NPV	Neto sadašnja vrednost, [EUR]
$Q$	Toplotna energija, [kWh]
$\dot{Q}$	Toplotna snaga, [kW]
$r$	Diskontna ili kamatna stopa, [–]
$\mathbb{R}$	Skup realnih brojeva
$\mathbb{R}_0^+$	Skup realnih nenegativnih brojeva
$S$	Skup svih izvodljivih rešenja problema optimizacije
$\mathbf{s}$	Vektor svih nezavisno promenljivih veličina u problemu optimizacije
$T$	Posmatrani vremenski period, [god.]
$t$	Temperatura, [°C]
$U$	Koeficijent prolaza toplote, [kW m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$W$	Električna energija, [kWh]
$\dot{W}$	Električna snaga, [kW]
$X$	Tok energije koji odgovara trenutnom opterećenju $\dot{X}$ , $X = \dot{X} \tau$ – zavisna veličina, [kWh]
$x$	Opšta realna nezavisno promenljiva veličina, [kW] ili [°C]
$\dot{X}$	Trenutno opterećenje komponente – realna nenegativna nezavisno promenljiva veličina, [kW]
$Y$	Tok energije koji odgovara snazi $\dot{Y}$ – zavisna veličina, [kWh]

$y$	Opšta realna zavisna veličina, [kW]
$\dot{Y}$	Snaga na ulazu ili izlazu iz komponente – zavisna veličina, [kW]
$Z$	Trošak, [EUR]
$z$	Opšta funkcija cilja, [EUR], [kWh], [kg CO <sub>2</sub> e] ili [–]

## Grčki simboli

$\alpha$	Koeficijent linearne regresije, [EUR kWh <sup>-1</sup> ]
$\beta$	Koeficijent linearne regresije, [EUR h <sup>-1</sup> ]
$\gamma$	Diskretna nezavisno promenljiva veličina – struktura postrojenja, projektni parametri i paketi mera uštede energije na strani potrošača, [–]
$\delta$	Binarna nezavisno promenljiva veličina – rad komponenata, [–]
$\varepsilon$	Ograničenje vrednosti funkcije, [EUR], [kWh], [kg CO <sub>2</sub> e] ili [–]
$\zeta$	Cena energije, [EUR kWh <sup>-1</sup> ]
$\check{\zeta}$	Cena angažovane električne snage, [EUR kW <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	Realna pomoćna nezavisno promenljiva veličina, [–]
$\mu$	Fazi funkcija pripadnosti, [–]
$\sigma$	Binarna pomoćna nezavisno promenljiva veličina – uključivanje komponenata, [–]
$\varsigma$	Binarna pomoćna nezavisno promenljiva veličina – isključivanje komponenata, [–]
$\tau$	Vreme, vremenski korak, [h]
$\varphi$	Faktor konverzije energije u primarnu energiju, [kWh kWh <sup>-1</sup> ]
$\psi$	Faktor konverzije energije u emisiju gasova sa efektom staklene bašte, [kg CO <sub>2</sub> e kWh <sup>-1</sup> ]
$\omega$	Težinski faktor

## Gornji indeksi

$i$	Indeks tipičnog ili projektnog perioda
$j$	Indeks vremenskog koraka
$u$	Indeks obračunskog perioda
$y$	Indeks godine

## Donji indeksi

0	Okolina, okolni vazduh
AR	Apsorpciona rashladna mašina
C	Konstantan
Cap	Kapacitet, vršna snaga
CG	Kogenerativna jedinica
CH	Kotao
CR	Kompresorska rashladna mašina
CT	Rashladni toranj
D	Potražnja
DP	Projektni period
E	Predata energija
e	Električna energija
Emb	Sastavna primarna energija ili emisija gasova sa efektom staklene bašte
ET	Transformator električne energije
f	Gorivo, energija goriva na osnovu donje toplotne moći
G	Bruto
GHG	Gasovi sa efektom staklene bašte
Grid	Mreža za prenos i distribuciju električne energije
HT	Visoka temperatura
I	Preuzeta energija
Inv	Investicija
JWC	Hladnjak motora
k	Indeks komponente
L	Linearan
l	Indeks nezavisno promenljive veličine ili funkcije cilja
lb	Donja granica
LC	Hladnjak ulja za podmazivanje
LT	Niska temperatura
m	Mehanički rad
max	Maksimum
min	Minimum
N	Neto
OM	Rad i održavanje
P	Primarna energija
q	Indeks
r	Toplotna energija hlađenja, rashladni učinak
Ref	Referentni (alternativni) scenario

RS	Hladni akumulator energije
T	Ukupno
t	Toplotna energija
TC	Hladnjak komprimovanog vazduha
TP	Tipičan period
TS	Topli akumulator energije
ub	Gornja granica
V	Varijabilan
X	Nezavisno promenljiva veličina
x	Uložena električna energija
XG	Iskorišćena toplotna energija izduvnih gasova
XGT	Ukupna toplotna energija izduvnih gasova
$\sigma$	Nestacionarni radni režim – uključivanje komponenata
$\varsigma$	Nestacionarni radni režim – isključivanje komponenata
$\tau$	Vremenski korak

# 1. Uvod

Kogeneracija ili spregnuta proizvodnja električne (ili mehaničke) i korisne toplotne energije je, generalno, veoma efikasan način konverzije hemijske energije goriva u oblike energije potrebne za zadovoljenje potreba korisnika za električnom energijom, mehaničkim radom, grejanjem, hlađenjem, pripremom vodene pare ili sanitarne tople vode itd. Postoji više tehnologija za kogeneraciju od kojih su neke danas dobro poznate i široko zastupljene, dok su druge u fazi razvoja ili istraživanja. U ovoj doktorskoj disertaciji će se posebno razmatrati poznate i često primenjivane tehnologije pogodne za primenu u slučajevima energetske snabdevanja zgrada — sistemi sa klipnim motorima sa unutrašnjim sagorevanjem i sistemi sa gasnim turbinama. Razmatranja koja su ovde predstavljena moguće je, uz eventualne korekcije, donekle primeniti i na druge tehnologije (sisteme sa parnim turbinama, gorivnim ćelijama ili drugim primarnim pokretačima).

Visoko efikasna kogeneracija je u razvijenim zemljama prepoznata kao značajno sredstvo za ostvarivanje najvažnijih ciljeva energetske politike: obezbeđenja pouzdanog, održivog i ekonomski prihvatljivog snabdevanja energijom, povećanja nivoa energetske efikasnosti, smanjenja energetske zavisnosti od drugih zemalja, smanjenja negativnog uticaja sistema za konverziju energije na životnu sredinu itd. Postrojenja za kogeneraciju manjih i srednjih snaga — pored višeg stepena energetske efikasnosti u odnosu na odvojenu proizvodnju električne i toplotne energije — su često locirana u blizini potrošača, pa su gubici energije u prenosu i distribuciji znatno niži. Prirodni gas, biogas ili deponijski gas, koji se često koriste kao goriva kod kogenerativnih motora sa unutrašnjim sagorevanjem, značajno su manji zagađivači u odnosu na ugalj, čije sagorevanje dominira u proizvodnji električne energije u nekim evropskim zemljama, uključujući i Srbiju. To se, pored ostalog, odnosi i na emisiju gasova sa efektom staklene bašte — uzročnika globalnog zagrevanja. Fleksibilna postrojenja za kogeneraciju — pre svega sa klipnim motorima sa unutrašnjim sagorevanjem — pogodna su za brzo puštanje u rad i promenu opterećenja i veoma su važna za stabilnost velikih elektroenergetskih sistema. To je posebno izraženo kod sistema sa značajnim udelom tehnologija za proizvodnju električne energije na bazi obnovljivih izvora čija raspoloživost značajno varira i teško se predviđa — energije Sunca i vetra. Fleksibilna postrojenja se uključuju kada nema dovoljno energije Sunca ili vetra i tako održavaju bilans između proizvodnje i potražnje električne energije.

Fleksibilni i efikasni sistemi sa kogeneracijom su pogodni za energetske snabdevanje zgrada. One su danas značajni potrošači energije i kao takve u velikoj meri doprinose negativnom uticaju energetske sektora na okolinu. Korisnicima zgrada energija je

najčešće potrebna za rad električnih aparata i uređaja, osvetljenje, grejanje, hlađenje, pripremu sanitarne tople vode, a nekada i vodene pare. Moderni koncepti predviđaju upotrebu električne energije za pogon automobila. Uz to, zgrade se odlikuju značajnim promenama potražnje različitih oblika energije na dnevnom, nedeljnom i godišnjem nivou.

Energetska efikasnost i uticaj na okolinu sistema za energetske snabdevanje zgrada se mogu dodatno poboljšati trigeneracijom — upotrebom električne ili toplotne energije dobijene kogeneracijom za hlađenje kompresorskim ili apsorpcionim rashladnim mašinama. Ovakvi sistemi često sadrže i akumulatore toplotne energije — tople i/ili hladne — čija je uloga višestruka: smanjenje potrebne instalisane snage ostalih komponenata, veća fleksibilnost i pouzdanost u radu sistema, omogućavanje rada komponenata za konverziju energije u režimima sa najvećom efikasnošću, vremensko odvajanje proizvodnje i potrošnje energije itd.

Ispravno projektovanje i planiranje rada kompleksnih energetske sistema — sa velikim brojem mogućih kombinacija komponenata i više mogućih radnih režima za svaku kombinaciju — zahteva naučni pristup i korišćenje složenih matematičkih alata. Iako postrojenja sa kogeneracijom, trigeneracijom i skladištenjem energije mogu biti pogodna sa energetske ili ekološke aspekta, za njihovu implementaciju je neophodno obezbediti i ekonomsku/finansijsku prihvatljivost. To je nekada moguće u tržišnim uslovima, ali su često potrebni novčani podsticaji koje države daju vlasnicima postrojenja. Važno je naglasiti da, u opštem slučaju, izborom konkretnog sistema i njegovog režima rada nije moguće istovremeno postići maksimalne željene rezultate u pogledu ekonomskih ili finansijskih rezultata, energetske efikasnosti i uticaja na životnu sredinu.

Optimizacija energetske sistema — njihove strukture, projektnih parametara komponenata i radnih režima — veoma je važna za obezbeđenje finansijske prihvatljivosti postrojenja, ali i definisanje što kvalitetnijih kompromisa između finansijskih, energetske i ekološke efekata. Sveobuhvatna optimizacija strukture, projektnih i radnih parametara je značajna prilikom identifikacije i evaluacije mogućnosti za izgradnju novih ili rekonstrukciju postojećih postrojenja, kao i u fazi projektovanja sistema. Optimizacija radnih parametara je korisna i za planiranje rada postojećih postrojenja. Kada je potrebno postići kompromis između različitih ciljeva, koriste se tehnike višekriterijumske optimizacije. Problemi optimizacije sa dva ili više nivoa mogu biti relevantni ukoliko su ciljevi optimizacije strukture i projektnih parametara sa jedne i radnih režima sa druge strane delimično ili potpuno suprotstavljeni. To je posebno pogodno kada se optimizacija energetske sistema koristi kao sredstvo energetske politike, pa je potrebno predvideti ponašanje potencijalnih korisnika podsticajnih mera u uslovima koje delimično kreira država. Sa naučnog aspekta, optimizacija energetske sistema je važna i da bi se identifikovali potencijali za njihovo energetske i ekološke unapređenje — uzimajući u

obzir realne uslove i finansijsku opravdanost — i definisale mere potrebne za ostvarivanje postavljenih ciljeva.

Optimizacija energetske sistema zauzima značajno mesto u naučnim, a sve češće i stručnim istraživanjima u oblastima energetike, energetske efikasnosti, obnovljivih izvora energije, energetske ekonomije, energetske politike itd. Naučni izazov predstavlja kako formulacija, tako i rešavanje problema optimizacije. U poređenju sa klasičnim simulacijama rada sistema, oni su kompleksniji u pogledu definisanja matematičkih modela i zahtevniji sa aspekta potrebnih računarskih resursa i vremena rešavanja.

Naučni napredak u oblasti optimizacije energetske sistema se može ostvariti kroz: poboljšanje matematičkih modela, poboljšanje samih metoda optimizacije, primenu ređe korišćenih ali pogodnih metaheurističkih metoda, kombinovanje različitih metoda itd. Ako se želi razvoj naučno zasnovanih i sofisticiranih alata za projektovanje kompleksnih energetske sistema, potrebno je mnogo više pažnje posvetiti projektnim zahtevima — njihovom matematičkom opisivanju i tretiranju u problemima optimizacije. Fazi programiranje je zasnovano na fazi skupovima i pogodno za probleme višekriterijumske optimizacije i tretman mekih ograničenja (koja ne moraju biti u potpunosti zadovoljena), ali malo zastupljeno u literaturi. Problemi optimizacije energetske sistema sa dva i više nivoa su retki, ali važni, pa je i njima potrebno posvetiti zasluženu pažnju.

U ovoj doktorskoj disertaciji je definisana metodologija optimizacije radnih parametara kompleksnih sistema za snabdevanje energijom sa trigeneracijom i skladištenjem energije. Odlikuje se visokom fleksibilnošću i mogućnošću korišćenja i kombinovanja više metoda optimizacije. Njen centralni segment je matematički model nastao kao sinteza dosadašnjih dostignuća u ovoj oblasti uz uvođenje određenih poboljšanja i generalizaciju nekih koncepata. Prikazani model predstavlja kompromis između zahteva za preciznošću, fleksibilnošću i mogućnošću uzimanja u obzir što većeg broja uticajnih parametara sa jedne strane i pogodnosti primene poželjnih tehnika optimizacije sa druge strane. Poseban akcenat je na mogućnosti korišćenja pomenute metodologije za optimizaciju strukture postrojenja i projektnih parametara, kao i na formulaciji problema višekriterijumske optimizacije. Optimizacija radnih parametara se može vršiti kombinovanjem metaheurističkih metoda i linearnog programiranja, kao i mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem. Pristup je pogodan za rad sa celokupnim posmatranim periodom optimizacije, kao i za njegovu aproksimaciju tipičnim periodima. Posebno mesto u disertaciji zauzima procedura optimizacije radnih parametara energetske sistema na bazi pokretnog perioda kratkoročne optimizacije.

U okviru ove disertacije je formulisana i metodologija optimizacije strukture postrojenja, projektnih parametara komponenata i radnih režima, zasnovana na strukturnoj

dekompoziciji problema i pogodna za probleme sa više nivoa optimizacije. Metodologija koristi razne metaheurističke metode za rešavanje diskretnog kombinatoričkog problema optimizacije strukture i projektnih parametara na višem nivou. Neke korišćene metode su široko zastupljene u literaturi, dok su druge retko korišćene. Na nižem, operativnom nivou, koristi se mešovito celobrojno linearno programiranje za rešavanje problema optimizacije projektnih parametara. Posebna pažnja je posvećena projektnim zahtevima, tj. mogućnostima zadovoljenja ekstremnih potreba korisnika za energijom.

Razvijeno je i opisano softversko rešenje za implementaciju predloženih metodologija, tj. za definisanje i rešavanje problema optimizacije, kao i obradu dobijenih rezultata.

Definisani pristup optimizaciji je ilustrovan na primeru izbora postrojenja sa trigeneracijom za snabdevanje energijom stambenog naselja. Potrebe korisnika su određene kombinovanjem rezultata merenja potrošnje energije i energetske simulacije razmatranih zgrada. Problem optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara postrojenja je višekriterijumski i ima dva nivoa: (1) viši nivo optimizacije strukture i projektnih parametara metaheurističkim metodama i (2) niži nivo optimizacije radnih parametara mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem. Korišćeno je više metaheurističkih metoda: genetski algoritam, kao do sada često korišćena metoda; optimizacija rojevima čestica, koja je uobičajena za rešavanje kontinualnih problema; simulirano kaljenje i tabu pretraga, kao primeri ređe korišćenih metoda za optimizaciju energetske sistema, pogodnih za diskretne probleme. Ista optimalna rešenja su dobijena primenom svih metoda. Za slučajeve problema optimizacije sa jednim nivoom, definisani su odgovarajući problemi mešovitog celobrojnog linearnog programiranja za integrisanu optimizaciju strukture, projektnih i radnih parametara redukcijom nadstrukture postrojenja, što je često korišćen pristup. Oba pristupa su rezultirala istim rešenjima.

Optimalni radni režimi su određivani i primenom pristupa koji koristi pokretni period kratkoročne optimizacije, bez aproksimacije tipičnim periodima. Ovaj pristup je poreden sa klasičnim, koji podrazumeva optimizaciju radnih parametara za celu godinu odjednom.

Ostatak ove doktorske disertacije podeljen je na sledeće glave: Stanje problema (glava 2), Pristup problemu (glava 3), Primena predložene metodologije (glava 4), Analiza rezultata (5) i Zaključci (glava 6).

U glavi 2 su opisani sistemi sa kogeneracijom, trigeneracijom i akumulatorima energije, pri čemu je naglasak na mogućnostima njihove implementacije, ograničenjima, koristima koje mogu da obezbede i radnim karakteristikama relevantnim za ovo istraživanje. Pregled literature je fokusiran na naučne radove u kojima su razmatrani sistemi sa kogeneracijom ili trigeneracijom uz korišćenje optimizacije radnih parametara, odnosno optimizacije

strukture, projektnih i radnih parametara. Analizirani su najvažniji aspekti matematičkog modeliranja i definisanja problema višekriterijumske optimizacije. Posebno mesto zauzima pregled radova sa fazi programiranjem. Na kraju su rezimirani postojeći trendovi u ovoj oblasti i moguća poboljšanja.

Glava 3 sadrži: opis razmatranog postrojenja, definiciju vremenskog okvira, matematički model za svaku komponentu i ceo sistem, formulaciju problema optimizacije, predlog i razradu metoda za njihovo rešavanje, kao i opis softverskog rešenja za definisanje i rešavanje pomenutih problema. Matematički model sadrži ograničenja, tj. jednačine i nejednačine veze, kao i funkcije cilja. Predložena su dva načina rešavanja problema optimizacije radnog režima. Prvi podrazumeva kombinovanje metaheurističkih metoda i linearnog programiranja, a drugi transformaciju problema i mešovito celobrojno linearno programiranje. Sa aspekta tretmana posmatranog perioda, postoje tri pristupa. Jedan podrazumeva razmatranje celog perioda i koristi pokretni period optimizacije i kratkoročne manje probleme. Kod drugog se rešava veći problem za celu godinu odjednom. Treći se bazira na aproksimaciji posmatranog perioda tipičnim periodima. Što se tiče kombinatoričkog problema optimizacije strukture i projektnih parametara, i tu su razmatrana dva pristupa. Prvi se bazira na strukturalnoj dekompoziciji problema i korišćenju metaheurističkih metoda — u ovom slučaju genetskog algoritma, optimizacije rojevima čestica, simuliranog kaljenja i tabu pretrage — u kombinaciji sa mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem. Drugi je pristup redukcije nadstrukture postrojenja mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem.

U glavi 4 je definisan primer stambenog naselja na kome je demonstrirana primena predložene metodologije. Formulisan je problem optimizacije. Prikazani su najvažniji ulazni parametri, mogućnosti za izbor komponenata postrojenja i funkcije cilja.

U glavi 5 su prikazani rezultati primene predložene metodologije na dva primera. Prvi primer obuhvata problem optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara sa dva nivoa. Vršena je višekriterijumska kombinatorička optimizacija, uz pretpostavku da postrojenje radi u finansijski optimalnom režimu. Pareto optimalna rešenja su dobijena korišćenjem metode  $\varepsilon$ -ograničenja, a demonstriran je i jednostavan slučaj korišćenja fazi formulacije problema. Drugi primer se odnosi na optimizaciju radnih parametara za jednu godinu korišćenjem pokretnog perioda optimizacije. Prikazana je analiza osetljivosti optimalnih rešenja na promene cena energenata, faktora konverzije i potreba korisnika.

Glava 6 sadrži zaključke, pre svega vezane za primenljivost predloženih pristupa optimizaciji i njihovo poređenje sa pristupima koji su u široj upotrebi, kao i za konkretne rezultate višekriterijumske optimizacije energetskih sistema. Analizirani su i mogući pravci budućih istraživanja.



## 2. Stanje problema

### 2.1. Kogeneracija toplotne i električne energije

U sistemima kogeneracije se hemijska energija goriva istovremeno transformiše u mehaničku i/ili električnu energiju i korisnu toplotnu energiju. Ovi sistemi mogu služiti za zadovoljenje potreba korisnika za mehančkom energijom, električnom energijom, vodenom parom, grejanjem prostora, pripremom sanitarne tople vode itd. Mogu se primenjivati u industriji, toplanama, komercijalnim zgradama, hotelima, bolnicama, stambenim objektima itd. Izbor primarnih pokretača ovih sistema je širok — od parnih i gasnih turbina, preko klipnih motora sa unutrašnjim sagorevanjem do Stirling motora (sa spoljašnjim sagorevanjem) i gorivnih ćelija. Neke od ovih tehnologija su danas u širokoj upotrebi, dok su druge još uvek u fazi razvoja ili istraživanja.

Izbor primarnog pokretača pre svega zavisi od: profila potražnje električne i toplotne energije, odnosa potrebnih količina ova dva oblika energije, kao i zahtevanog kvaliteta (temperature) toplotne energije predate potrošačima. Takođe je veoma važno da li će postrojenje biti povezano sa elektrodistributivnom mrežom ili raditi potpuno nezavisno, kao i da li će se proizvedena električna energija prodavati distributeru. Iskorišćenje dobijene toplotne energije je često od ključnog značaja za ekonomsku izvodljivost postrojenja sa kogeneracijom.

Generalno, sistemi kogeneracije predstavljaju efikasan način konverzije energije nastale sagorevanjem goriva. U nastavku će se razmatrati mali i srednji sistemi kogeneracije električnih snaga od oko 100 kW do nekoliko megavata. Ovakvi sistemi su obično distribuirani — nalaze se u blizini potrošača energije, prvenstveno toplotne, pa se zbog toga često odlikuju manjim gubicima u distribuciji u poređenju sa velikim centralizovanim sistemima. Pored toga, njihova fleksibilnost je od velikog značaja, posebno kada je reč o energetsom snabdevanju zgrada.

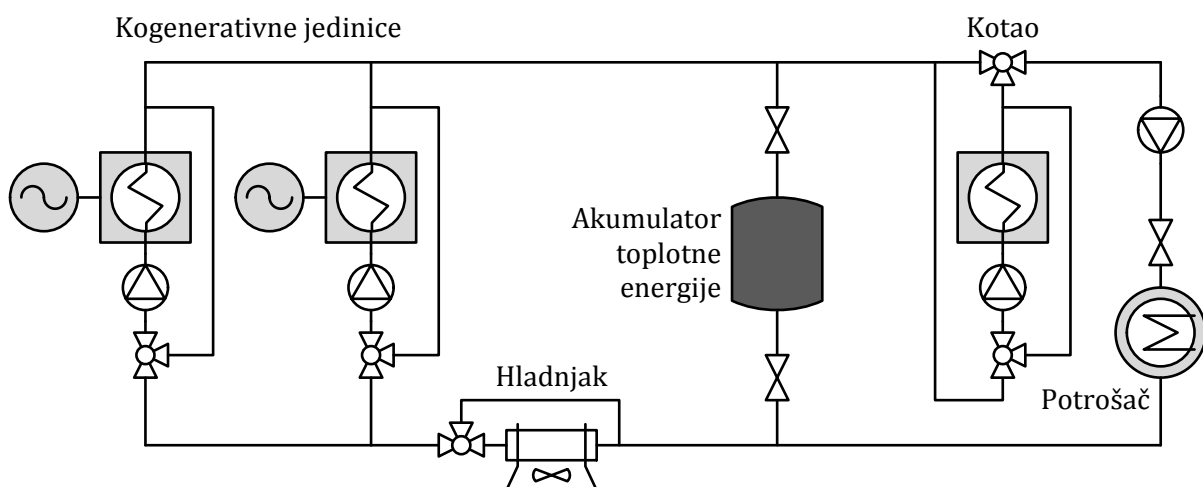
Zgrade, koje predstavljaju značajne potrošače energije — prema [1] koriste 40 % primarne energije na globalnom nivou i uzrokuju oko 30 % emisije CO<sub>2</sub> — odlikuju se značajnim varijacijama potražnje energije na dnevnom, nedeljnom i godišnjem nivou. Pored toga, fleksibilni sistemi su veoma bitni za rad čitavih elektroenergetskih sistema, posebno u slučajevima liberalizovanog tržišta električne energije sa značajnim udelom tehnologija na bazi obnovljivih izvora čija se raspoloživost ne može predvideti — energije Sunca i vetra.

Efikasnost sistema za snabdevanje energijom se može dodatno povećati trigeneracijom — korišćenjem energije dobijene kogeneracijom za hlađenje. Jedan od načina je pogon kompresorskih rashladnih mašina mehaničkom ili električnom energijom dobijenom kogeneracijom. Takođe, toplotna energija dobijena kogeneracijom se može, pored grejanja, iskoristiti i za hlađenje pomoću apsorpcionih rashladnih mašina. Ovo je posebno pogodno u letnjim mesecima kada je potreba za toplotnom energijom iz kogeneracije veoma mala ili uopšte ne postoji.

Sastavni deo fleksibilnih sistema za snabdevanje energijom su često i akumulatori toplotne energije — topli ili hladni — kojima se smanjuje vršno opterećenje, povećava pouzdanost i fleksibilnost rada sistema, omogućava rad ostalih komponenata sa punim kapacitetom i većom efikasnošću, uklanja neophodnost istovremene proizvodnje i potrošnje energije itd.

Pojednostavljena šema sistema kogeneracije sa dva gasna motora sa unutrašnjim sagorevanjem sa generatorima kojima je dodat akumulator toplotne energije i kotao za vršna opterećenja je prikazana na slici 2.1. Motori su međusobno obično termički povezani paralelno, dok sa kotlom mogu biti povezani redno (kao na slici 2.1) ili paralelno.

Veliki broj mogućih kombinacija komponenata sistema za snabdevanje energijom, kao i znatan broj različitih radnih režima svake od ovih kombinacija, čine projektovanje i planiranje rada sistema izuzetno kompleksnim problemom. Problem postaje još složeniji kada se u obzir uzmu različiti ciljevi izgradnje i rada postrojenja koji mogu biti međusobno suprotstavljeni: profit, finansijska i ekonomska održivost, energetska efikasnost, globalni i lokalni uticaj na životnu sredinu, sigurnost snabdevanja korisnika, pouzdanost rada



**Slika 2.1.** Pojednostavljena šema sistema kogeneracije sa akumulatorom toplotne energije i dodatnim kotlom

sistema itd. Matematička formulacija i rešavanje problema optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara sistema za snabdevanje energijom predstavljaju veoma važno naučno i stručno pitanje današnjice i temu brojnih naučnih radova objavljenih u poslednjih 15-ak godina.

Opis konstrukcije, strukture i principa rada komponenata i celokupnih sistema sa kogeneracijom i trigeneracijom dat je u osnovnoj literaturi, npr. [2–5] ili [6]. Sistemi kogeneracije su posebno razmatrani u [7, 8]. Termodinamičke osnove date su u [9], a termoekonomske u [10]. Važan izvor informacija o radnim karakteristikama komponenata su katalogi i ostale publikacije proizvođača, kao i neka softverska rešenja, npr. BCHP Screening Tool [11].

U nastavku će posebna pažnja biti posvećena radnim karakteristikama komponenata sistema kogeneracije i trigeneracije, mogućnostima njihovog povezivanja u cilju energetske efikasnosti i finansijski prihvatljivog snabdevanja energijom zgrada, optimizaciji ovih sistema i izboru kriterijuma optimizacije. Zato će se kao primarni pokretači najviše razmatrati danas najčešće primenjivane tehnologije u tercijarnom i rezidencijalnom sektoru — gasni klipni motori i gasne turbine.

### **2.1.1. Sistemi kogeneracije sa klipnim motorima sa unutrašnjim sagorevanjem**

Klipni motori sa unutrašnjim sagorevanjem mogu raditi po termodinamičkom Otto ciklusu. Takvi motori za stacionarno sagorevanje uglavnom koriste gasovita goriva — prirodni gas, biogas, deponijski gas itd. Zbog toga se zovu i gasnim motorima. Takođe se koriste motori koji rade po Diesel ciklusu i koriste tečno (dizel) gorivo. Njihove nominalne mehaničke snage mogu biti od nekoliko kilovata do nekoliko desetina megavata.

Energija goriva koja se oslobađa sagorevanjem u cilindrima se transformiše u mehaničku energiju. Mehanička energija se u generatoru električne energije transformiše u električnu. Toplotna energija se dobija hlađenjem izduvnih gasova, motora, ulja za podmazivanje i komprimovanog vazduha na ulazu u motor ukoliko postoji turbo-punjenje. Dobijena toplotna energija se mora odvesti od motora kako bi se obezbedio normalan rad. To znači da, ukoliko ne postoji mogućnost njenog iskorišćenja, energija dobijena hlađenjem motora, ulja i vazduha, mora biti odvedena u atmosferu odgovarajućim hladnjacima odnosno rashladnim tornjevima.

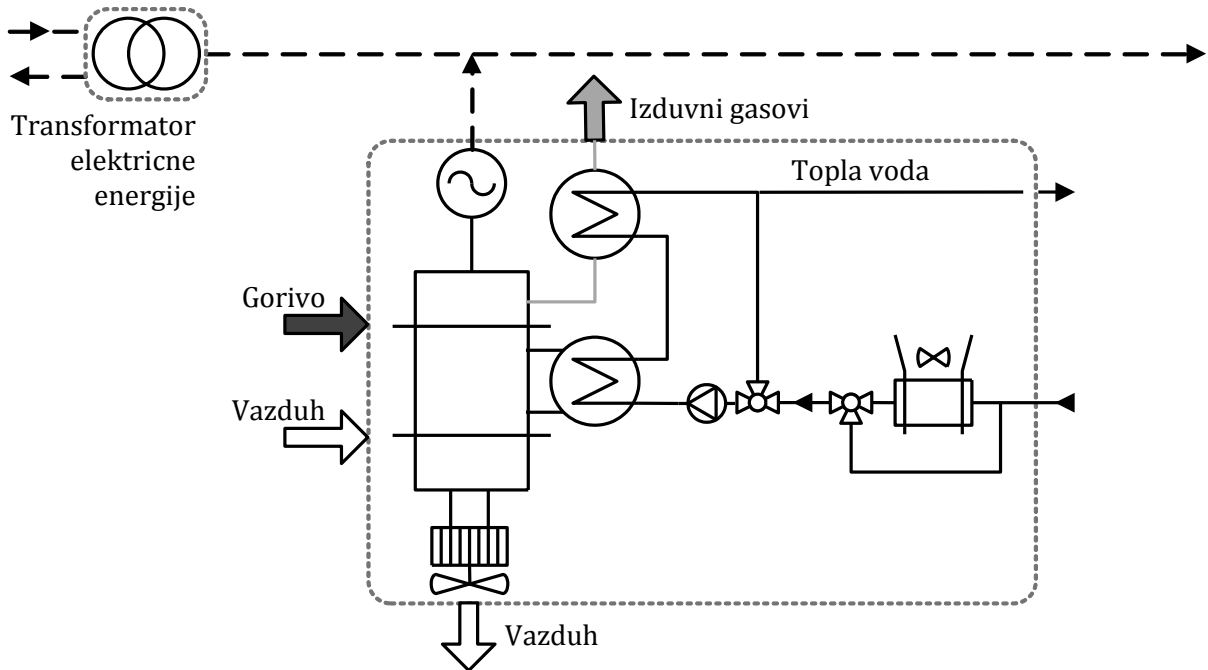
Izduvni gasovi se obično hlade sa početne temperature koja kod gasnih motora može biti između 370 °C i 650 °C do 120 °C ili 150 °C. Dalje hlađenje bi moglo dovesti do

kondenzacije i stvaranja kiselina u izduvnim kanalima. Toplotna energija dobijena iz izduvnih gasova predstavlja najkvalitetniji deo toplotne energije dobijene kogeneracijom sa klipnim motorima. Voda za hlađenje motora obično ima ulaznu temperaturu od 74–79 °C i izlaznu temperaturu od 79–88 °C, ali postoje i konstrukcije kod kojih dostiže preko 110 °C. Razlika ulazne i izlazne temperature treba da bude do 8 °C da bi se izbegao toplotni stres. Iskoristivost ovog izvora energije je najčešće ključna za isplativost kogeneracije sa gasnim motorima. Cilj sistema za hlađenje ulja je održavanje temperature ulja na oko 88 °C. Voda kojom se hladi ulje obično dostiže temperaturu do 74 °C.

Većina današnjih gasnih motora snage preko 300 kW<sub>e</sub> ima turbo-punjenje u cilju postizanja većih snaga. Turbo-punjači su kompresori ulaznog vazduha pogonjeni turbinama kroz koje velikom brzinom prolaze vrući izduvni gasovi izlazeći iz cilindra u okolinu. Veće snage se postižu zahvaljujući većim količinama vazduha i goriva koje dospevaju u cilindar. Vazduh za sagorevanje na izlazu iz kompresora, obično temperature 120–140 °C, se hladi u cilju smanjenja specifične zapremine do oko 45 °C ili 90 °C i tako se dobija deo korisne toplotne energije. Niža temperatura izlaznog vazduha znači veću mehaničku snagu motora, ali je raspoloživa toplotna energija niskog kvaliteta, tj. temperature do 30–35 °C i može se eventualno koristiti za predgrevanje napojne vode. Sa druge strane, viša izlazna temperatura najčešće znači kvalitetniji toplotni izlaz i najčešće višu termičku efikasnost motora. Moguće je hlađenje vazduha iz kompresora izvesti u dva stupnja — najpre do 90 °C, čime se dobija korisna toplotna energija za grejanje, a zatim do 45 °C. Raspored izmenjivača toplote zavisi od upotrebe toplotne energije iz ovog izvora.

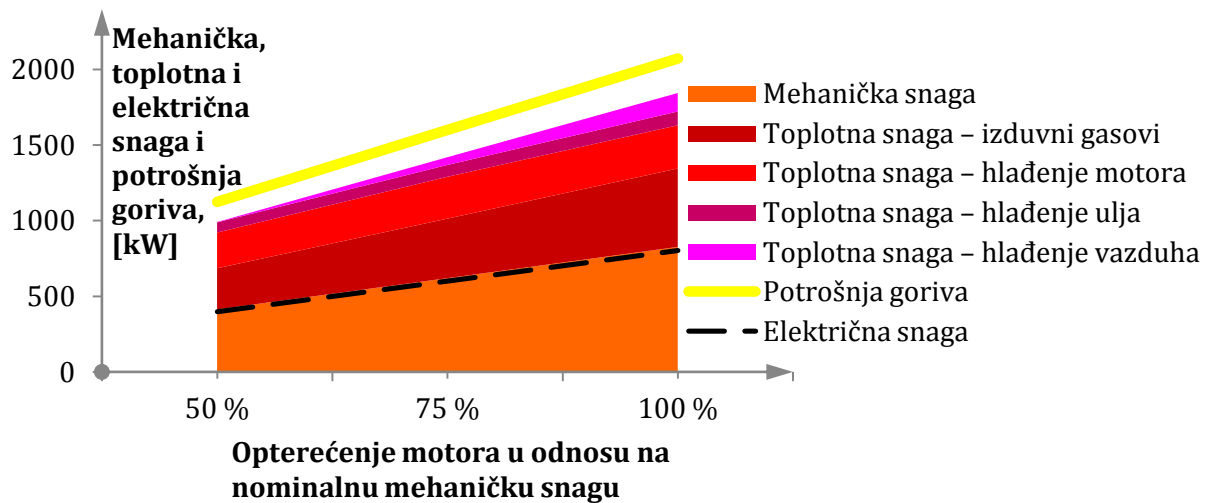
Iskorišćenje toplotne energije dobijene kogeneracijom u gasnim motorima zavisi od namene motora, tj. karakteristika potrošača. Toplotna energija izduvnih gasova je pogodna za dobijanje niskopritisne vodene pare u industriji ili bolnicama, grejanje prostora, pripremu sanitarne tople vode ili apsorpciono hlađenje. Toplotna energija niže temperature ima mnogo ograničeniju primenu: topla voda temperature 90 °C se može koristiti za grejanje prostora, pripremu sanitarne tople vode i eventualno apsorpciono hlađenje, dok se topla voda na temperaturi ispod 45 °C može koristiti za predgrevanje sanitarne tople vode ili kondenzata u industriji.

Odvođenje toplotne energije iz motora se izvodi preko sistema za hlađenje. Veoma je čest slučaj da motor ima dva sistema za hlađenje. U jednom sistemu se odvodi energija niske temperature, nastala hlađenjem ulja ili vazduha, koja se ne može iskoristiti. Drugi sistem služi za iskorišćenje korisne energije. Konstrukcija motora i raspored izmenjivača toplote mogu varirati zavisno od namene kogenerativne jedinice. Na slici 2.2 prikazana je šema gasnog motora sa krugom tople vode koja se zagreva pomoću dva izmenjivača toplote — najpre hlađenjem motora, a zatim i izduvnim gasovima, dok poseban hladnjak služi za odvođenje niskotemperaturne toplotne energije.



Slika 2.2. Pojednostavljena šema motora sa unutrašnjim sagorevanjem sa izmenjivačima toplote, generatorom i transformatorom električne energije

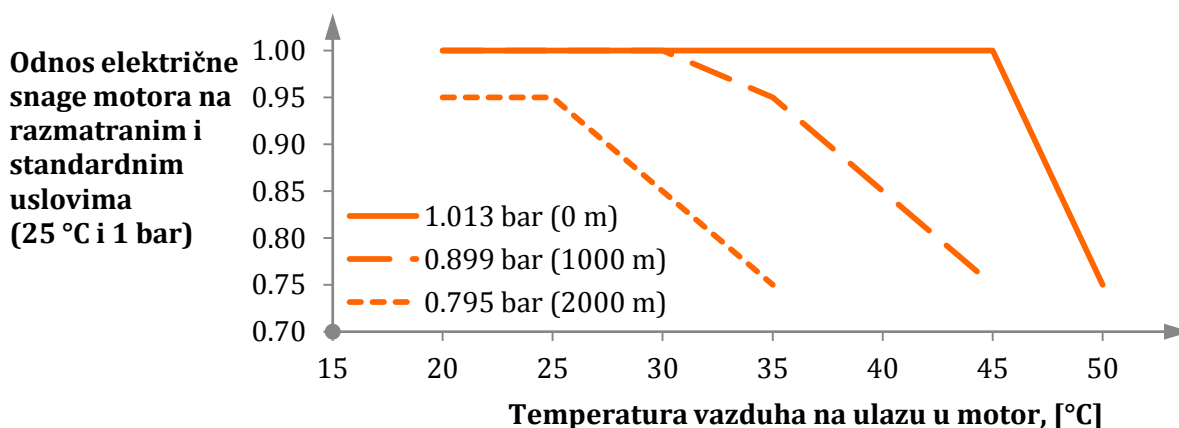
Radne karakteristike, pre svega energetski bilans, kao i električna i toplotna efikasnost gasnog motora zavise od trenutnog opterećenja i mogu se značajno razlikovati u odnosu na performanse pri radu sa nominalnim opterećenjem. Primer zavisnosti radnih karakteristika, tj. energetskih tokova gasnog motora sa generatorom nominalne mehaničke snage  $827 \text{ kW}_m$  od parcijalnog opterećenja prema [8] dat je na slici 2.3.



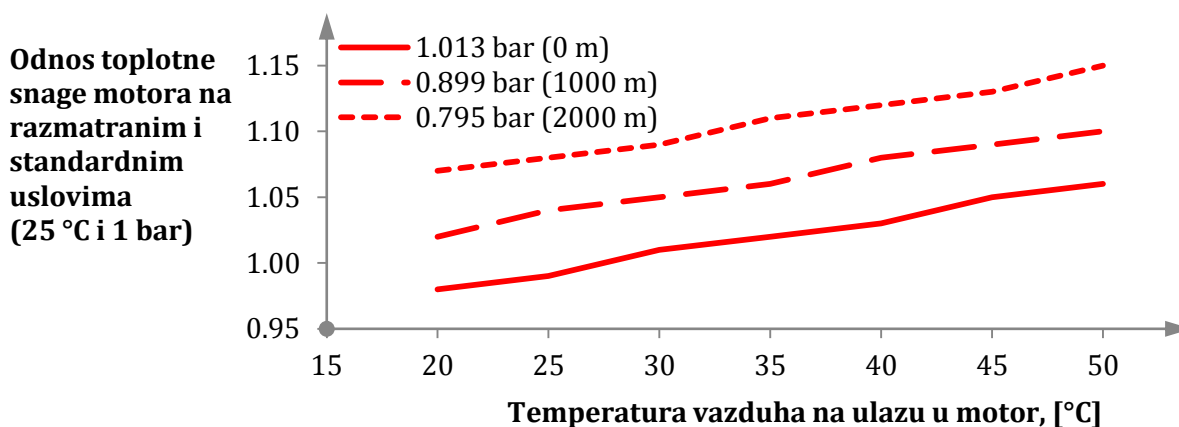
Slika 2.3. Primer radnih karakteristika gasnog motora sa generatorom nominalne mehaničke snage  $827 \text{ kW}_m$  pri parcijalnim opterećenjima. Potrošnja goriva je prikazana na osnovu donje toplotne moći

Radne karakteristike gasnih klipnih motora zavise i od stanja okolnog vazduha. Mehanička i električna snaga opadaju oko 2–3 % na svakih 300 m nadmorske visine, mada ima i motora kod kojih gotovo da nema promena do oko 1500 m, kao i oko 0,18 % sa porastom temperature okoline od 1 °C. Primer zavisnosti električne i korisne toplotne snage pri maksimalnom opterećenju gasnog motora sa generatorom od atmosferskih uslova — temperature vazduha i pritiska, odnosno nadmorske visine — dat je na slikama 2.4 i 2.5.

Klipni motori sa unutrašnjim sagorevanjem sa izduvnim gasovima, pored CO<sub>2</sub>, emituju i lokalne zagađivače, među kojima su najproblematici oksidi azota, pre svega NO i NO<sub>2</sub>, zatim CO i nesagoreli ili delimično sagoreli nemetanski ugljovodonici. Emisija oksida sumpora, pre svega SO<sub>2</sub>, najviše zavisi od njegovog sadržaja u gorivu. Buka je značajan problem kod klipnih motora, pa je neophodno posebnu pažnju posvetiti zvučnoj zaštiti.



Slika 2.4. Primer zavisnosti električne snage motora sa generatorom od temperature i pritiska vazduha (odnosno nadmorske visine)



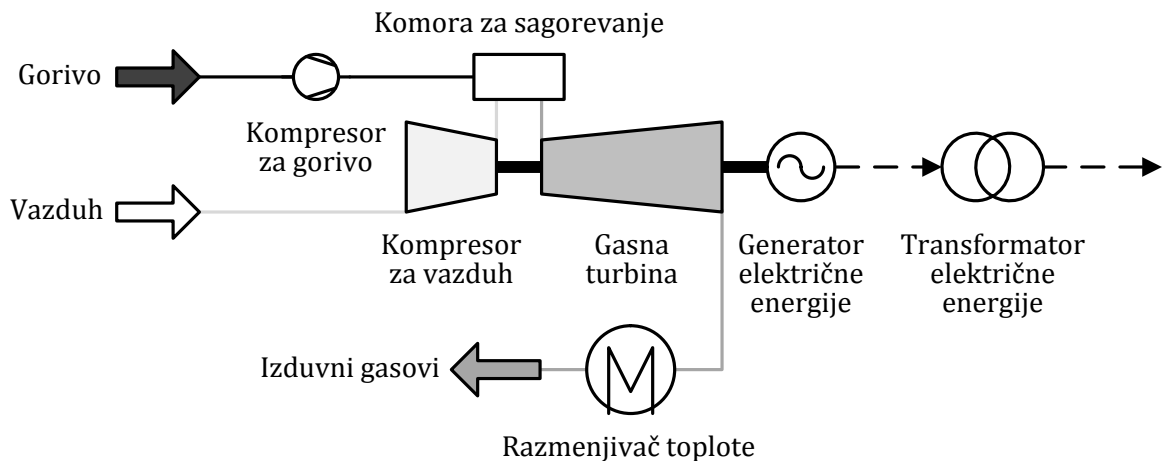
Slika 2.5. Primer zavisnosti toplotne snage motora sa generatorom pri maksimalnom opterećenju od temperature i pritiska vazduha (odnosno nadmorske visine)

### 2.1.2. Sistemi kogeneracije sa gasnim turbinama

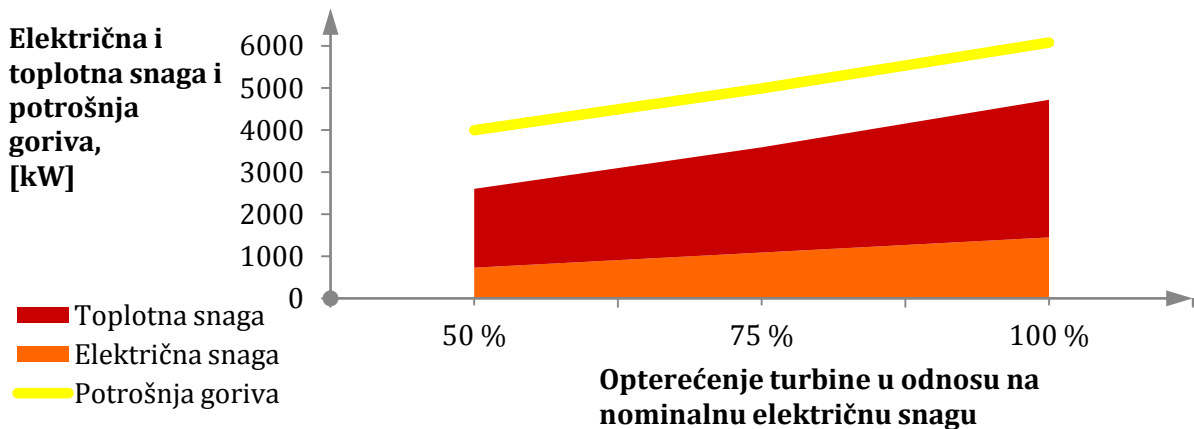
Sistemi sa gasnim turbinama najčešće rade po otvorenom termodinamičkom Brayton ciklusu: vazduh se usisava iz okoline u kompresor, komprimuje, vodi u komoru za sagorevanje gde mešavina goriva i vazduha sagoreva, a zatim izduvni gasovi pokreću gasnu turbinu. Radni fluid je vazduh. Takođe je moguće realizovati zatvoreni ciklus kada se kao radni fluid koristi vazduh ili helijum. Pokretanjem gasne turbine dobija se mehanički rad na vratilu koji se može iskoristiti za pokretanje generatora električne energije, kompresora rashladnih mašina itd. Gasne turbine mogu imati nominalne kapacitete od nekoliko kilovata do nekoliko stotina megavata. Turbine nominalnih snaga do  $500 \text{ kW}_m$  se nazivaju mikroturbinama, a između  $500$  i  $1000 \text{ kW}_m$  miniturbinama. Jednostavna šema sistema kogeneracije sa gasnom turbinom je prikazana na slici 2.6.

Izduvni gasovi nakon turbine ulaze u razmenjivač toplote gde se dobija korisna toplotna energija. Dobijena toplotna energija je visoke temperature — preko  $450 \text{ °C}$  — pa su gasne turbine pogodne za proizvodnju vodene pare, ali i za visokotemperaturno grejanje, pripremu sanitarne tople vode itd. Alternativno, izduvni gasovi se mogu direktno koristiti za pogon apsorpcionih rashladnih uređaja ili sušenje. Takođe je moguće izvesti naknadno sagorevanje imajući u vidu činjenicu da su bogati kiseonikom (što nije slučaj kod klipnih motora).

Slično gasnim motorima, energetski bilans i radne karakteristike gasnih turbina variraju značajno u zavisnosti od parcijalnih opterećenja. Primer zavisnosti radnih karakteristika sistema sa gasnom turbinom i generatorom nominalne električne snage  $1450 \text{ kW}$  od opterećenja prema [12] je dat na slici 2.7.



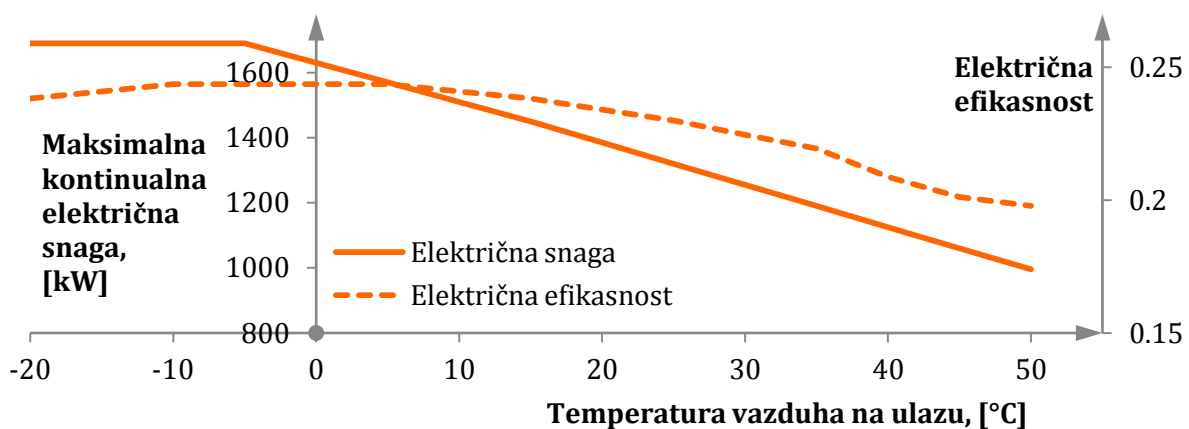
**Slika 2.6.** Pojednostavljena šema kogenerativnog postrojenja sa gasnom turbinom koje radi u otvorenom ciklusu



**Slika 2.7.** Primer radnih karakteristika sistema sa gasnom turbinom i generatorom nominalne električne snage 1450 kW pri parcijalnim opterećenjima. Potrošnja goriva je prikazana na osnovu donje toplotne moći

Radne karakteristike gasnih turbina zavise i od nadmorske visine, temperature okolnog vazduha, pritiska vazduha na ulazu u kompresor i pritiska gasova na izlazu iz turbine. Porast temperature okolnog vazduha za 10 °C prosečno smanjuje dobijenu mehaničku snagu za oko 9 %. Mehanička snaga opada za oko 3,5 % na svakih 300 m nadmorske visine. Pad pritiska na ulazu takođe utiče na smanjenje snage za oko 2 % po 1 kPa, a pad pritiska na izlazu za oko 1,2 % po 1 kPa pada pritiska. Primer zavisnosti električne snage i efikasnosti sistema sa gasnom turbinom i generatorom pri maksimalnom kontinualnom opterećenju od temperature vazduha na ulazu prema [12] je dat na slici 2.8.

Nekada je pogodno hladiti vazduh pre ulaza u kompresor u cilju povećanja snage i efikasnosti postrojenja, posebno u predelima sa toplom klimom.



**Slika 2.8.** Primer zavisnosti električne snage i efikasnosti sistema sa gasnom turbinom i generatorom pri maksimalnom kontinualnom opterećenju od temperature vazduha na ulazu

### **2.1.3. Poređenje sistema kogeneracije sa klipnim motorima i gasnim turbinama**

Prema [6], gasne turbine se odlikuju sledećim prednostima: visoka pouzdanost koja omogućava dugotrajan rad bez prekida, toplotni izlaz na visokoj temperaturi, veliki odnos snage i mase, nema potrebe za rashladnom vodom, mogućnost korišćenja širokog spektra goriva i nizak nivo emisije štetnih gasova u poređenju sa klipnim motorima. Nedostaci gasnih turbina su: niža mehanička efikasnost u poređenju sa klipnim motorima, ukoliko se koristi gasovito gorivo, ono mora da se isporuči na visokom pritisku ili u okviru postrojenja mora postojati kompresor za gorivo, visok nivo visokofrekventne buke koja se lakše neutrališe, niska efikasnost pri niskim opterećenjima, mada je moguć kontinualan rad, značajan pad izlazne snage i električne efikasnosti sa porastom temperature okoline i dugi periodi održavanja.

Sa druge strane, prednosti gasnih klipnih motora su: visoka efikasnost prilikom rada sa punim i parcijalnim opterećenjima, fleksibilan rad sa širokim spektrom parcijalnih opterećenja i mogućnost brze promene opterećenja, pogodnost za praćenje električnog ili toplotnog opterećenja, pogodnost za korišćenje u ostrvskom režimu, mogućnost brzog puštanja u rad — svega 15 s do punog električnog opterećenja — u poređenju sa gasnim turbinama kojima može biti potrebno 30 min–2 h, mogućnost korišćenja raznih goriva, mogućnost rada sa gasom niskog pritiska, do 1 bar, kao i mogućnost održavanja na mestu korišćenja. Nedostaci gasnih motora su: stalna potreba za hlađenjem, čak i kada nema potrebe za toplotnom energijom, mali odnos snage i mase, visok nivo niskofrekventne buke i visoki troškovi održavanja.

U odnosu na sisteme kogeneracije sa parnim turbinama, klipni motori i gasne turbine imaju visoku fleksibilnost, prednost rada sa parcijalnim opterećenjima i znatno kraće vreme puštanja u rad. Sa druge strane, kod parnih turbina postoji mogućnost variranja odnosa dobijene električne i toplotne energije, dobija se toplotni izlaz na veoma visokim temperaturama i mogu se koristiti najrazličitija goriva — čvrsta, tečna ili gasovita. Kombinovana parno-gasna postrojenja sadrže i parne i gasne turbine kao primarne pokretače, a ređe kombinaciju parnih turbina i gasnih motora.

U sistemima kogeneracije koji se koriste za energetske snabdevanje zgrada se najčešće koriste mikroturbine za male snage (npr. do 50 kW<sub>e</sub>), gasni motori koji dominiraju kod snaga između 100 kW<sub>e</sub> i 2 MW<sub>e</sub> ukoliko nema potrebe za vodenom parom i gasne turbine za veće snage i posebno kada je potrebna proizvodnja vodene pare. Kod sistema za energetske snabdevanje zgrada, fleksibilnost u radu, mogućnost brzog puštanja u rad i brze promene opterećenja, kao i kontinualan rad sa parcijalnim opterećenjima su najvažnije karakteristike koje sistem kogeneracije treba da poseduje.

## **2.2. Trigeneracija**

Trigeneracija predstavlja konverziju hemijske energije goriva u tri oblika energije. Ovaj pojam se najčešće odnosi na slučajeve korišćenja energije dobijene kogeneracijom za hlađenje, bilo da je reč o mehaničkoj ili električnoj energiji korišćenim za pogon kompresorskih rashladnih mašina ili toplotnoj energiji koja se koristi za apsorpcione rashladne mašine. Treba naglasiti da je za pogon apsorpcionih mašina neophodna i izvesna količina električne energije. Korišćenje toplotne energije dobijene kogeneracijom za hlađenje je posebno pogodno jer je u letnjim mesecima potreba potrošača za toplotnom energijom često znatno manja nego zimi ili uopšte ne postoji.

Jedan od načina apsorpcionog hlađenja podrazumeva korišćenje tople vode temperature između 82 °C i 110 °C ili vodene pare pritiska do 200 kPa za pogon jednostepenih apsorpcionih rashladnih mašina. Ovakve mašine imaju koeficijent hlađenja 0,7 ili niži pri maksimalnom opterećenju. Pogodne su za primenu sa klipnim motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, posebno sa motorima snaga do 2000 kW<sub>e</sub> kod kojih je uobičajeno da se toplotna energija hlađenja motora i ulja i energija izduvnih gasova predaju preko istog izmenjivača toplote. Opseg kapaciteta jednostepenih mašina je 18–5800 kW<sub>r</sub>.

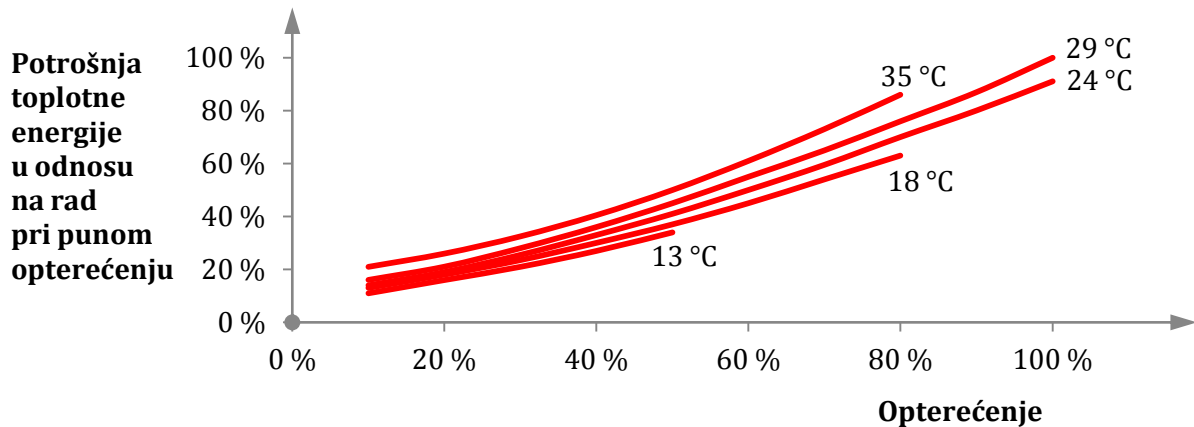
Ukoliko se toplotna energija iz kogeneracije koristi za dobijanje vodene pare viših pritisaka, npr. energija iz izduvnih gasova gasnih postrojenja ili motora sa unutrašnjim sagorevanjem, mogu se upotrebiti dvostepene apsorpcione rashladne mašine koje najčešće koriste vodenu paru na pritiscima između 400 i 900 kPa. Koeficijent hlađenja ovih mašina pri maksimalnom opterećenju je 1,2. Njihovi kapaciteti su obično od 350 do 6000 kW<sub>r</sub>. Takođe postoje dvostepene apsorpcione mašine koje umesto tople vode ili vodene pare koriste vrele izduvne gasove iz gasnih turbina ili klipnim motora. Ove mašine obično imaju koeficijent hlađenja oko 1,3.

Pored pomenutih jednostepenih i dvostepenih indirektnih apsorpcionih rashladnih mašina koje koriste tople fluide za pogon, u upotrebi su i direktne mašine u kojima se odvija sagorevanje najčešće gasovitog goriva.

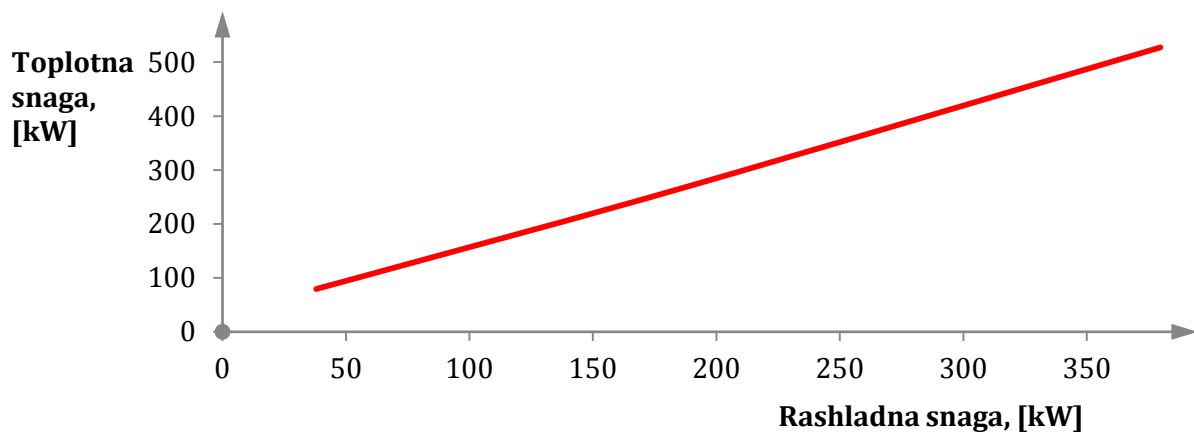
Radne karakteristike kompresorskih i apsorpcionih rashladnih mašina značajno zavise od temperatura isparavanja i kondenzacije rashladnog ciklusa. Niža temperatura isparavanja i viša temperatura kondenzacije znače niži koeficijent hlađenja. Temperatura isparavanja je ograničena sa gornje strane zahtevima korisnika, tj. potrebnom temperaturom hladene vode koja u slučajevima hlađenja zgrada najčešće nije niža od 5 °C. Temperatura kondenzacije zavisi od temperature okoline — u većoj meri prilikom korišćenja vazduhom hlađenih rashladnih mašina, a u manjoj kada se koriste vodom hladene mašine u kombinaciji sa rashladnim tornjevima. Primer zavisnosti radnih karakterisitika

jednostepene apsorpcione rashladne mašine pri parcijalnim opterećenjima, temperaturi hladene vode 7 °C i različitim temperaturama rashladne vode prema [13] dat je na slici 2.9. Primer zavisnosti dovedene toplotne snage i dobijene rashladne snage pri različitim nivoima opterećenja kod jednostepene apsorpcione rashladne mašine rashladnog kapaciteta 380 kW prema [11] dat je na slici 2.10. Primer zavisnosti rashladnog kapaciteta jednostepene apsorpcione rashladne mašine od temperatura hladene i rashladne vode takođe prema [11] prikazan je na slici 2.11.

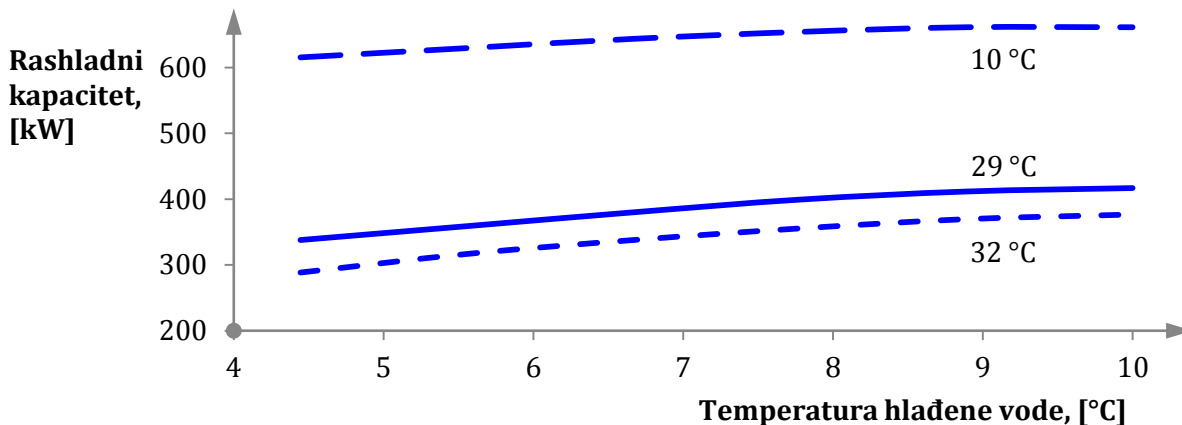
Kada je reč o apsorpcionim rashladnim mašinama, njihove performanse, a pre svega raspoloživa rashladna snaga značajno zavise od temperature i pritiska toplog fluida na ulazu. Primer pada rashladnog kapaciteta jednostepene apsorpcione rashladne mašine u zavisnosti od temperature toplog fluida na ulazu prema [14] prikazan je na slici 2.12.



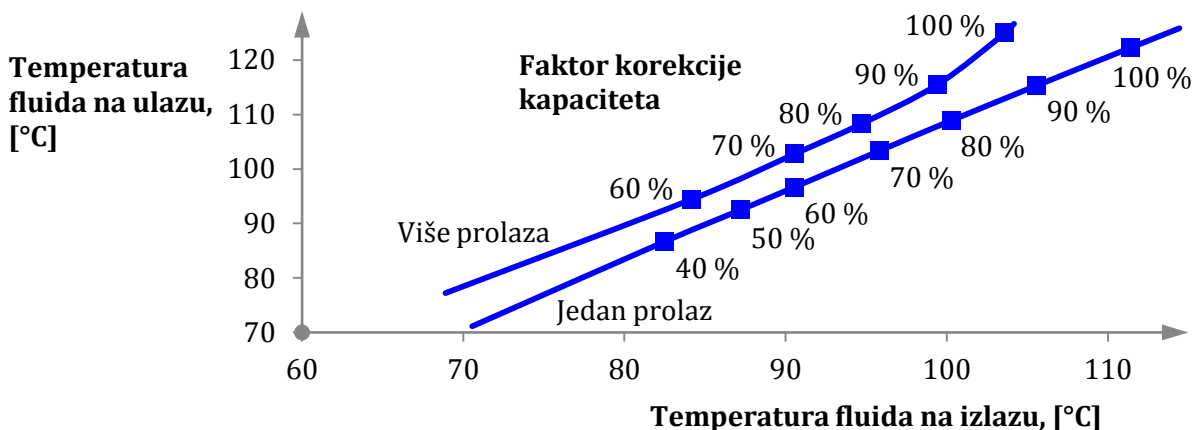
**Slika 2.9.** Primer radnih karakteristika jednostepene apsorpcione rashladne mašine pri parcijalnim opterećenjima, temperaturi hladene vode 7 °C i različitim temperaturama rashladne vode



**Slika 2.10.** Primer zavisnosti dovedene toplotne snage i dobijene rashladne snage kod jednostepene apsorpcione rashladne mašine rashladnog kapaciteta 380 kW



Slika 2.11. Primer zavisnosti rashladnog kapaciteta jednostepene apsorpcione rashladne mašine od temperatura hladene i rashladne vode



Slika 2.12. Zavisnost kapaciteta i temperature toplog fluida na izlazu jednostepene apsorpcione rashladne mašine od temperature toplog fluida na ulazu

Ovde je veoma važno uzeti u obzir i povratne temperature toplog fluida iz apsorpcionih rashladnih mašina koje bi trebalo da odgovaraju prihvatljivim vrednostima na ulazu u motore kako bi se izbeglo dodatno hlađenje fluida i gubitak korisne toplotne energije.

Pitanje isplativosti apsorpcionog hlađenja u odnosu na kompresorsko je veoma kompleksno. Sa jedne strane, apsorpcione rashladne mašine mogu koristiti toplotnu energiju iz kogeneracije koja bi inače bila odbačena u okolinu, ali i otpadnu toplotnu energiju iz industrijskih procesa i sl. Sa druge strane, moderne kompresorske rashladne mašine imaju veoma visoke koeficijente hlađenja — njihova vrednost može biti i preko 6 za mašine hladene vodom. Ipak treba imati u vidu da se koeficijent hlađenja kod apsorpcionih mašina bazira na korišćenju toplotnog, a kod kompresorskih električnog ulaza. Takođe, upravo zbog velike razlike u koeficijentima hlađenja, postrojenja sa apsorpcionim mašinama moraju imati rashladne tornjeve znatno većeg kapaciteta.

## **2.3. Skladištenje toplotne energije**

Uloga sistema skladištenja, tj. akumulatora toplotne energije je dovođenje toplotne energije medijumu za skladištenje i odvođenje toplotne energije od njega onda kada je to potrebno. Osnova koncepta primene akumulatora toplotne energije je mogućnost razdvajanja vremena tokom koga se proizvodi energija potrebna za grejanje ili hlađenje i vremena tokom koga se energija troši.

Postoji više načina skladištenja toplotne energije i više medijuma koji su danas u upotrebi, a osnovna podela sistema za skladištenje je prema temperaturi medijuma na tople i hladne. Kod toplih akumulatora temperatura medijuma je viša od temperature okoline i odgovara temperaturnom nivou na na kome se potrošač snabdeva toplotnom energijom. Hladni akumulatori se koriste kao sastavni deo sistema hlađenja i kod njih temperatura medijuma odgovara potrebnoj temperaturi rashladnog fluida.

Medijumi toplih akumulatora mogu biti: voda, cigla, kamen, keramički materijali i dr, a hladnih: takođe voda, led, drugi fluidi, materijali sa promenom faza itd. Ovi medijumi se razlikuju po karakteristikama od kojih su najvažnije specifični toplotni kapacitet i temperatura na kojoj se javlja promena faza, tj. agregatnog stanja. Na osnovu agregatnog stanja medijuma, moguće je podeliti akumulatore toplotne energije na akumulatore osećajne i latentne toplotne energije. Kod prvih nema promene faze medijuma, već se dovođenje i odvođenje energije manifestuje promenom temperature medijuma. Kod drugih, koji se često koriste u sistemima hlađenja, dolazi do promene faze medijuma, pa se deo kapaciteta bazira na latentnoj toploti promene faze. Tipičan primer akumulatora sa promenom faze su hladni akumulatori sa ledom. Korišćenje latentne toplote omogućava kompaktnije konstrukcije, ali zahteva hlađenje do nižih temperatura, a time i veću potrošnju energije za pogon rashladnih mašina.

Ispravno projektovani i korišćeni akumulatori energije donose višestruke koristi:

- Smanjenje potrošnje energije i troškova rada postrojenja. Korišćenjem akumulatora omogućava se rad ostalih komponenata sa nominalnim kapacitetom i najvišom mogućom efikasnošću, čime se potpuno ili delimično izbegava manje efikasan rad sa parcijalnim opterećenjima. Takođe se omogućava rad u periodima kada je cena energije niža. Ovo je posebno važno za komponente za čiji pogon se koristi električna energija npr. toplotne pumpe i kompresorske rashladne mašine. Iako se najviše energije za grejanje i hlađenje troši danju, ona se može proizvoditi noću, kada je cena električne energije znatno niža, kao i angažovana snaga. Uz to, noću su i niže temperature okolnog vazduha, pa rashladne mašine rade sa višim koeficijentom hlađenja zbog niže temperature kondenzacije.

- Smanjenje instalisane snage ostalih komponenata sistema i ukupne investicije. Komponente sistema — gasni motori i turbine, kotlovi, toplotne pumpe, rashladne mašine, rashladni tornjevi, električni transformatori itd — ne moraju biti dimenzionisane za pokrivanje vršnog opterećenja ukoliko postoje odgovarajući akumulatori energije koji mogu preuzeti ovu ulogu.
- Veća fleksibilnost i pouzdanost u radu sistema za snabdevanje energijom.
- Obezbeđivanje rezervnih kapaciteta bez ugradnje komponenata koje bi bile retko korišćene ili uopšte ne bi bile korišćene.
- Povećanje kapaciteta postojećih sistema omogućavanjem rada ostalih komponenata kada su opterećenja niska i korišćenjem akumulirane energije u periodima visokih opterećenja.
- Ostale koristi, npr. upotreba hladnih akumulatora sa vodom kao medijumom u sistemima zaštite od požara itd.

Uslovi koji pogoduju upotrebi akumulatora toplotne energije su:

- postojanje kratkih, neredovnih ili cikličnih opterećenja, kao i opterećenja koja se ne poklapaju sa dostupnošću izvora energije,
- vremenski zavisne cene energenata,
- visoke cene angažovane snage,
- planiran porast opterećenja uz nemogućnost postojeće opreme da zadovolji takvo opterećenje,
- nemogućnost tolerancije prekida u snabdevanju energijom,
- postojanje određenih finansijskih podsticaja.

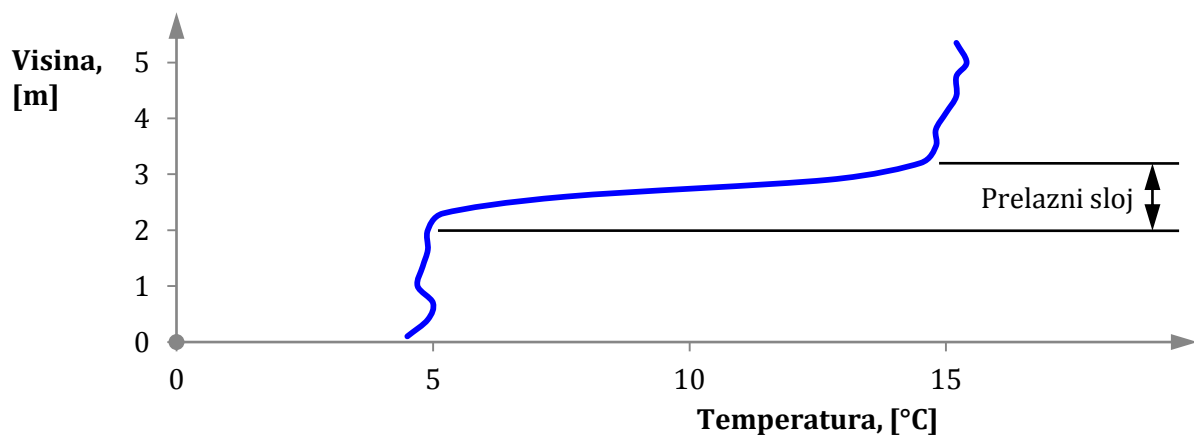
U nastavku će uglavnom biti reči o toplim i hladnim akumulatorima koji koriste vodu kao skladišni medijum, bez promene faza jer to, kao što je već rečeno, zahteva hlađenje na niže temperature.

Akumulatori sa vodom kao medijumom bez promene faza mogu biti izvedeni kao rešenja sa mešanjem vode u kojima je temperatura vode u svim delovima uravnotežena i rešenja sa stratifikacijom, gde se usled razlike u gustinama formiraju gornji — topliji i donji — hladniji sloj, kao i tanak prelazni sloj između njih. Drugi tip ima očiglednu prednost koja se ogleda u mogućnosti snabdevanja korisnika vodom više temperature u režimu grejanja, odnosno niže temperature u režimu hlađenja.

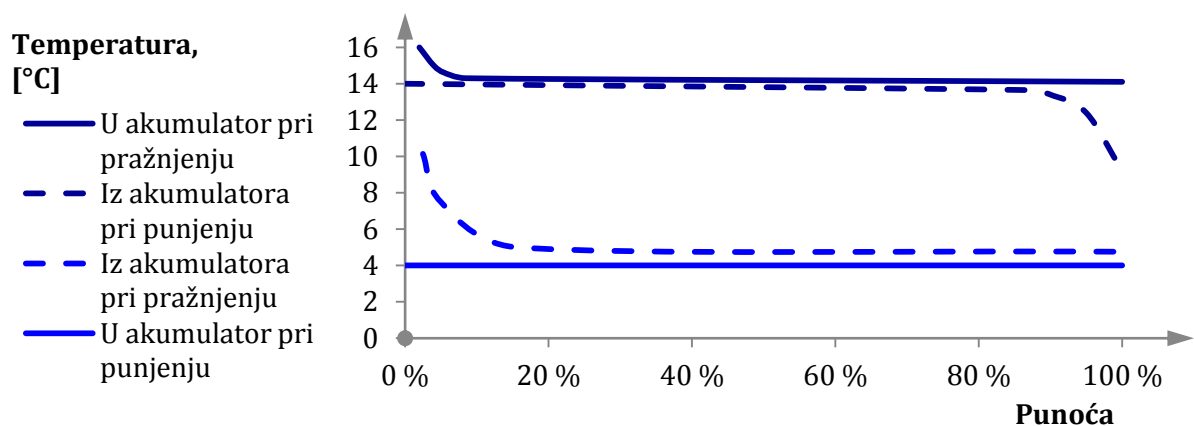
Stratifikovani akumulatori najčešće imaju oblik relativno uskih i visokih vertikalnih cilindara u cilju smanjenja zapremine vode u prelaznom sloju. Tipičan profil temperature

vode unutar stratifikovanog hladnog akumulatora prema [3] je prikazan na slici 2.13. Kod stratifikovanih akumulatora se topla voda dovodi i odvodi sa vrha, a hladna sa dna. Tipični profili temperature vode na ulazu i izlazu iz hladnog akumulatora toplotne energije prema [3] su dati na slici 2.14.

Određivanje optimalne veličine akumulatora energije predstavlja kompleksan zadatak koji zavisi od mnogih faktora — profila opterećenja, cena energenata, potrebe za fleksibilnošću itd. Kako je interakcija akumulatora energije sa drugim komponentama ključna za iskorišćenje mogućnosti koje pružaju, prilikom njihovog izbora i projektovanja se mora imati u vidu struktura celog sistema za snabdevanje energijom, kao i projektne i radne karakteristike ostalih komponenata.



**Slika 2.13.** Tipičan profil temperature vode unutar stratifikovanog hladnog akumulatora toplotne energije



**Slika 2.14.** Tipični profili temperature vode na ulazu i izlazu iz hladnog akumulatora toplotne energije

## **2.4. Radni režimi sistema kogeneracije i trigeneracije**

Osnovna uloga sistema za snabdevanje energijom je pouzdano, ekonomski i ekološki prihvatljivo, delimično ili potpuno zadovoljenje energetske potrebe korisnika. Ovo su osnovna ograničenja koja se odnose na projektovanje energetske postrojenja i planiranje njihovog rada.

Zadovoljenje energetske potrebe korisnika se, u slučaju energetskog snabdevanja zgrada, uglavnom odnosi na zadovoljenje potreba za električnom energijom, sanitarnom toplom vodom i termičkim komforom — grejanjem i hlađenjem prostora. Kod drugih potrošača, pre svega industrijskih, može se javiti i potreba za mehaničkom energijom ili vodenom parom. Iako se korišćenjem kogeneracije i trigeneracije može smanjiti ukupna potrošnja energije, neefikasnosti na strani potrošača se ne mogu otkloniti. Naprotiv, implementacijom ovih sistema se mere uštede energije na strani potrošača mogu učiniti ekonomski, a nekada čak i ekološki manje prihvatljivim.

Kompleksna postrojenja sa kogeneracijom i posebno trigeneracijom, kao i akumulatorima energije, mogu biti projektovana i korišćena na mnogo različitih načina. Pri tome je veoma poželjno pri projektovanju uzeti u obzir i moguće režime rada. Izbor najbolje konfiguracije ovakvih postrojenja, adekvatnih komponenata sistema i radnog režima je tehnički i matematički složen zadatak koji u mnogome zavisi od kriterijuma koji se definišu kao ciljevi realizacije projekta implementacije sistema sa kogeneracijom odnosno trigeneracijom.

Prema [7, 8], može se razlikovati nekoliko karakterističnih režima rada kogenerativnih sistema:

- Samostalan rad ili rad u izolovanom, tj. tzv. „ostrvskom“ režimu podrazumeva pokrivanje ukupnog toplotnog i električnog opterećenja pomoću sistema za kogeneraciju, bez povezivanja sa elektrodistributivnom mrežom. Ovakav režim rada zahteva dodatne toplotne i električne kapacitete koji bi predstavljali rezervu u slučaju prestanka rada ili prilikom održavanja komponenata za kogeneraciju i predstavlja najskuplju strategiju, bar kada su u pitanju početni investicioni troškovi. Takođe, postrojenje često prati potrebu za električnom energijom potrošača, pa se može desiti da je neophodno odbaciti u okolinu višak proizvedene toplotne energije, ukoliko za njom nema potražnje ni mogućnosti da se skladišti.
- Pokrivanje baznog opterećenja zahteva vezu postrojenja sa elektrodistributivnom mrežom i dodatne toplotne kapacitete. Komponente za kogeneraciju se dimenzionišu prema baznom električnom ili toplotnom opterećenju i najčešće rade sa punim kapacitetom.

- Pokrivanje vršnog opterećenja kogeneracijom takođe zahteva vezu sa elektrodistributivnom mrežom. Jedinice za kogeneraciju se koriste tokom kratkog vremena kada je potreba za električnom energijom visoka, prevashodno u cilju smanjenja troškova trenutne angažovane električne snage.
- Praćenje trenutnog opterećenja podrazumeva rad kogenerativnih jedinica sa trenutnom toplotnom ili električnom snagom jednakom potrebi potrošača. Praćenje potrebe za toplotnom energijom predstavlja radni režim tokom koga postrojenje radi sa opterećenjem dovoljnim da se pokrije zahtev za toplotnom energijom. Ukoliko se na taj način dobije više električne energije nego što je potrebno, višak se predaje elektrodistributivnoj mreži. Ukoliko se dobije manje električne energije, manjak se nadoknađuje preuzimanjem iz mreže. Praćenje potrebe za električnom energijom predstavlja režim tokom koga postrojenje radi sa opterećenjem jednakim zahtevu za električnom energijom. Ukoliko se dobije više toplotne energije nego što je potrebno, višak se skladišti u akumulatoru ili predaje okolini preko izduvnih gasova ili pomoću izmenjivača toplote sa prinudnom konvekcijom, tj. ventilatorima. Ako se dobije manje toplotne energije, ostatak se nadoknađuje iz akumulatora ili iz drugih izvora, npr. kotlova ili toplotnih pumpi. Moguće je kombinovati praćenje toplotnih i električnih potreba potrošača.
- Rad sa punim kapacitetom karakteriše rad kogenerativnih jedinica sa punim opterećenjem bez obzira na potrebe za električnom i toplotnom energijom. Ukoliko postoji višak električne energije, ona se predaje mreži, a ukoliko postoji manjak, energija se preuzima iz mreže. Ukoliko postoji višak toplotne energije, skladišti se u akumulatoru ili nepovratno odvodi u okolinu, a ko postoji manjak, ostatak se nadoknađuje iz akumulatora ili drugih izvora. Ovakav režim može biti poželjan kada je cena po kojoj se prodaje električna energija visoka, pa se isplati da jedinice rade i kada nije moguće iskoristiti svu toplotnu energiju.
- Rad u — najčešće finansijski — optimalnom režimu predstavlja radni režim koji karakteriše primena posebnog sistema za regulaciju radnih parametara i softvera za njihovo određivanje na osnovu zadate funkcije cilja.

Kada je u pitanju trigeneracija, i posebno ukoliko se razmatraju i kompresorske i apsorpcione rashladne mašine, kao i akumulatori energije, broj mogućih režima rada se značajno uvećava.

Da bi se odredio najpoželjniji, tj. optimalni režim rada u svakom trenutku, neophodno je koristiti sofisticirane matematičke alate. Pored toga, potrebno je jasno definisati i matematički formulisati cilj sa kojim se vrši izbor režima rada, kao i ograničenja koja postrojenje mora zadovoljiti.

## **2.5. Energetski i ekološki aspekti korišćenja sistema sa kogeneracijom**

Kao što je već rečeno, kogeneracija predstavlja relativno efikasan način konverzije energije goriva u električnu ili mehaničku i korisnu toplotnu energiju. Efikasnost se može povećati korišćenjem energije dobijene kogeneracijom za hlađenje, kao i upotrebom akumulatora toplotne energije. Uz to, blizina malih postrojenja kogeneracije ili trigeneracije potrošačima smanjuje gubitke u transportu i distribuciji energije u poređenju sa centralizovanim sistemima velike snage. Sve ovo distribuirane sisteme kogeneracije i trigeneracije malih i srednjih snaga čini energetski efikasnijim u poređenju sa konceptom snabdevanja energijom koji je dominantan u Srbiji: preuzimanje električne energije čija je proizvodnja u velikoj meri zasnovana na sagorevanju uglja u velikim termoelektranama iz elektrodistributivne mreže, grejanje kotlovima na čvrsto, tečno ili gasovito gorivo i hlađenje malim, relativno neefikasnim (u pogledu koeficijenta hlađenja) kompresorskim rashladnim jedinicama hlađenim vazduhom (tzv. split sistemima).

Ipak, da bi se procenili, tj. vrednovali efekti kogeneracije i trigeneracije, neophodno je pažljivo analizirati njihove karakteristike, režime rada i mogućnost zadovoljenja energetskih potreba korisnika, ali i, u cilju poređenja, definisati alternativne, tj. referentne opcije snabdevanja svim oblicima energije. Na primer, sistemi kogeneracije sa motorima koji koriste prirodni gas mogu biti energetski efikasniji i ekološki poželjniji od elektrana na ugalj ili kotlova, ali ne i od sistema kod kojih se celokupna potreba za energijom obezbeđuje iz obnovljivih izvora energije. Takođe je neophodno precizno matematički definisati kriterijum poređenja. U naučnoj i stručnoj literaturi sistemi snabdevanja energijom, tj. njihova efikasnost i uticaj na okolinu, porede se na osnovu potrošnje primarne energije ili emisije gasova sa efektom staklene bašte. Moguće je koristiti i druge kriterijume, npr. emisiju lokalnih zagađivača i sl.

U [3] se za poređenje sistema kogeneracije i alternativnih sistema predlaže relativna razlika potrošnje goriva dve alternative — tzv. ušteda energije goriva. Veoma slično, u Direktivi 2004/8/EC Evropskog parlamenta i Saveta Evrope o promociji kogeneracije [15], kao i u novijoj Direktivi o energetskoj efikasnosti [16], kao mera energetske efikasnosti kogeneracije utvrđuje se relativna razlika potrošnje finalne energije između kogenerativnog i referentnog sistema odvojene proizvodnje električne i toplotne energije. Indikator se računa na osnovu stepena korisnosti.

Prema Direktivi [15], visoko-efikasna kogeneracija je od velikog značaja za Evropsku uniju zbog potencijala uštede primarne energije, smanjenja štetnih emisija, posebno gasova sa efektom staklene bašte, obezbeđenja sigurnog snabdevanja energijom i pozitivnog

uticaja na kompetitivnost. U smislu ove direktive, da bi se postrojenje za kogeneraciju smatralo visoko-efikasnim, potrebno je postići vrednost uštede primarne energije od najmanje 10 % za postrojenja snage preko 1 MW<sub>e</sub> odnosno 0 % za manje snage. Direktiva [16] prepoznaje značaj visoko-efikasne kogeneracije i/ili daljinskog grejanja i hlađenja za ispunjenje tzv. ciljeva 20–20–20 Evropske unije u pogledu povećanja energetske efikasnosti i smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte do 2020. godine. Takođe se naglašava važnost razmatranja radnih uslova za što bolje iskorišćenje potencijala uštede primarne energije, dok se u Direktivi o energetskim performansama zgrada [17] ističe značaj efektivnosti i optimalnosti troškova mera energetske efikasnosti.

U Republici Srbiji je kogeneracija takođe prepoznata kao poželjan način konverzije energije i predviđene su podsticajne mere — uslovi i tarife za prodaju električne energije — za rad efikasnih kogenerativnih postrojenja [18–20]. Kao kriterijum efikasnosti se uzima tzv. ukupna efikasnost ili ukupan stepen korisnosti, definisan takođe i u [3, 8], inače veoma problematičan parametar zbog sumiranja količina kvalitativno različitih oblika energije — električne i toplotne.

Potrošnja primarne energije predstavlja značajan indikator za ocenu energetske efikasnosti sistema za snabdevanje energijom i omogućava poređenje različitih oblika energije — hemijske energije goriva bazirane na gornjoj ili donjoj toplotnoj moći, električne, mehaničke i toplotne energije — korišćenjem odgovarajućih konverzionih faktora. Konverzioni faktori služe za svođenje svih oblika energije na primarnu energiju. Ipak, ovaj parametar ne pruža nikakvu indicaciju o tome da li je reč o obnovljivim ili neobnovljivim izvorima energije, kao ni o ekološkim uticajima korišćenja nekog energenta.

Emisija gasova sa efektom staklene bašte je samo jedan od mnogih mogućih indikatora kojima se kvantifikuje ekološki uticaj energetskih sistema. Veoma je često korišćen zbog velikog interesovanja naučnika, stručnjaka i donosioca odluka za globalno zagrevanje koje se smatra posledicom emisije ovih gasova i jednim od najvećih izazova sa kojima se čovečanstvo danas suočava. Korišćenje ovog indikatora omogućava uzimanje u obzir kvalitativne razlike između raznih izvora energije odnosno energenata. Uz to, mogućnost trgovine emisijom gasova sa efektom staklene bašte pruža određenu vezu ovog kriterijuma sa ekonomskim i finansijskim indikatorima.

Prilikom procene energetskih i ekoloških indikatora sistema za kogeneraciju i trigeneraciju mora se imati u vidu da pun procenjeni potencijal uštede primarne energije ili smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte nije uvek moguće realizovati jer u opštem slučaju izbor strukture, projektnih i radnih parametara postrojenja ne može istovremeno dati najbolje ekonomske, energetske i ekološke efekte.

## **2.6. Matematičko modeliranje i optimizacija sistema trigeneracije**

Problemi optimizacije sistema za snabdevanje energijom najčešće spadaju u kategoriju problema sa ograničenjima — jednačinama i nejednačinama veze koje čine matematički model postrojenja, kao i u kategoriju problema sa više nezavisno promenljivih veličina. Funkcije cilja mogu biti različite, a veoma su česti problemi sa više funkcija cilja, tzv. problemi višekriterijumske optimizacije ili optimizacije vektora. U literaturi se najčešće više kriterijuma uzima u obzir metodom težinskih suma, tj. formiranjem jedne funkcije cilja koja predstavlja linearnu kombinaciju svih kriterijuma. Takođe je često prisutan pristup u kome se jedan kriterijum zadržava kao funkcija cilja, a ostali se tretiraju u formi ograničenja.

Pregled i opis metoda optimizacije koje se često koriste u naučnim i stručnim tehničkim problemima dat je u [21]. Veoma sofisticirane formulacije problema optimizacije mogu se dobiti korišćenjem fazi skupova i fazi logike [22].

Najjednostavniji problemi optimizacije energetskih sistema su linearni, a nezavisno promenljive veličine su kontinualne. Ovakvi problemi se rešavaju linearnim programiranjem [23, 24] — nekom varijantom simpleks metode ili metodom unutrašnje tačke. Problemi linearnog programiranja se danas veoma efikasno rešavaju, čak i kada imaju više stotina hiljada nezavisno promenljivih veličina. Takođe su veoma pogodni za analizu osetljivosti i interpretaciju rezultata. Pouzdani su i uvek daju tačno rešenje (ukoliko rešenje problema postoji). Sa druge strane, da bi se definisao problem linearnog programiranja, najčešće je neophodno uvesti značajna uprošćenja matematičkog modela.

Nelinearni kontinualni problemi se mogu rešavati klasičnim tehnikama matematičkog programiranja, npr. metodom Lagrangeovih množilaca. Generalno se metode za rešavanje ovih problema mogu podeliti na: direktne, kod kojih se ograničenja eksplicitno tretiraju i indirektno, kod kojih se problem rešava kao niz neograničenih problema optimizacije.

Matematički modeli koji sadrže celobrojne, najčešće binarne tj. 0–1, nezavisno promenljive veličine obično znatno bolje predstavljaju energetski sistem. Celobrojne veličine omogućavaju modeliranje logičkih ograničenja, uzimanje u obzir donje granice opterećenja komponenata, razmatranje uključivanja i isključivanja komponenata itd. Sa druge strane, uključivanje većeg broja celobrojnih nezavisno promenljivih veličina čini problem optimizacije značajno složenijim i težim za rešavanje. Primena tehnika celobrojnog programiranja zahteva više vremena za rešavanje i bolje računarske resurse. U slučaju optimizacije energetskih sistema, retko se javljaju problemi koji sadrže samo celobrojne nezavisno promenljive veličine, već obično postoje i celobrojne i kontinualne

veliĉine. Ovakvi problemi su problemi mešovitoĝ celobrojnog programiranja. U literaturi se najĉešće javljaju problemi mešovitoĝ celobrojnog linearnog programiranja koji se obiĉno rešavaju metodom grananja i ograniĉavanja ili grananja i seĉenja.

Kompleksni nelinearni problemi, kao i problemi sa celobrojnim nezavisno promenljivim veliĉinama se ĉesto rešavaju metaheuristiĉkim metodama [25] koje se konceptualno razlikuju od klasiĉnih, tradicionalnih tehnika matematiĉkog programiranja. Najveći broj njih ne zahteva određivanje izvoda funkcija, već samo vrednosti funkcije cilja, što im daje na fleksibilnosti. Metaheuristiĉke metode se zasnivaju najĉešće, ali ne iskljuĉivo, na stohastiĉkom pretraživanju skupa izvodljivih rešenja i težnji za poboljšavanjem rešenja korišćenjem logike bazirane na prirodnim ili socijalnim metaforama. Neke metaheuristiĉke metode, pre svega genetski algoritmi i uopšte evolutivni algoritmi, ali i optimizacija rojevima ĉestica su se pokazali efikasnim i pogodnim za primenu prilikom optimizacije energetskih sistema.

Hibridne metode optimizacije nastaju kombinovanjem dveju ili više metoda optimizacije. Ĉesto se metaheuristiĉke metode kombinuju sa klasiĉnim metodama matematiĉkog programiranja. Takođe, metoda grananja i seĉenja — jedna od najzastupljenijih metoda mešovitoĝ celobrojnog linearnog programiranja — je nastala kombinovanjem metoda grananja i ograniĉavanja i preseĉnih ravni.

## **2.7. Pregled literature**

### **2.7.1. Sistemi kogeneracije i trigeneracije**

U osnovnoj literaturi, ali i u nauĉnim radovima postoji puno analiza o znaĉaju implementacije sistema kogeneracije i trigeneracije, kao i mogućim koristima — finansijskim i ekonomskim, energetskim i ekološkim. Iako je neosporno da od kogeneracije znaĉajne koristi mogu imati i vlasnici postrojenja i potrošaĉi energije [26], mora se imati u vidu da efekti implementacije ovih sistema znaĉajno zavise od vrste i kapaciteta komponenata, vrste potrošaĉa, cena energenata i mnogih drugih faktora, pa je teško izvesti opšte zakljuĉke u vezi sa njihovom kvantifikacijom. Rezultati takođe znaĉajno zavise i od kompromisa između zadovoljenja razliĉitih ciljeva jer u opštem sluĉaju, ĉak i kada postoje podsticajne mere, nije moguće istovremeno potpuno iskoristiti potencijal finansijskih koristi, uštede energije i smanjenja emisije štetnih gasova [27].

Chicco i Mancarella [28] su definisali opšti indikator za kvantifikaciju potencijala uštede primarne energije sistema trigeneracije, sliĉno klasiĉnom indikatoru za kogeneraciju. Na jednostavan ali sveobuhvatan naĉin, koristeći tri tipična dana u godini, pokazali

su značajnu zavisnost uštede primarne energije implementacijom malih trigenerativnih postrojenja od:

- potrebe korisnika za energijom,
- tipova izabranih komponentata, tj. strukture postrojenja,
- režima rada postrojenja,
- izbora referentne, tj. alternativne opcije za snabdevanje energijom, odnosno efikasnosti sistema sa kojim se postrojenje za trigeneraciju poredi.

Sličan pristup je primenjen na kvantifikaciju mogućnosti smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte [29, 30] i ostalih zagađivača [31] i proširen na poligeneraciona postrojenja [32].

Sistemi za kogeneraciju sa gasnim motorima, posebno u kombinaciji sa akumulatorima toplotne energije, se odlikuju visokim stepenom fleksibilnosti — mogućnošću brzog uključivanja i promene opterećenja, što je od suštinskog značaja za kombinovanje sa tehnologijama na bazi obnovljivih izvora energije čija se raspoloživost ne može precizno predvideti i može značajno varirati — pre svega energije Sunca i vetra [33].

Verda i Colella [34] su na primeru sistema daljinskog grejanja sa kogeneracijom pokazali da korišćenje toplih akumulatora energije može rezultirati značajnim smanjenjem potrošnje energije i određenim ekonomskim dobitima, pre svega usled veće količine energije dobijene kogeneracijom ali i zbog mogućnosti proizvodnje dela energije noću. Pored simulacije rada sistema daljinskog grejanja, ovde je korišćena i proračunska dinamika fluida za simulaciju procesa unutar akumulatora korišćenjem jednodimenzionog modela. Još jedna od prednosti korišćenja akumulatora je smanjenje potrebnog kapaciteta komponentata koje služe za pokrivanje vršnih opterećenja [35] i vremena njihovog rada [36]. Kombinovanjem akumulatora toplotne energije sa postrojenjima za kogeneraciju se fokus planiranja režima rada može pomeriti sa potrebe za zadovoljenjem toplotnog opterećenja korisnika ka radu u periodima kada je cena isporučene električne energije visoka. Takođe se omogućava kontinualan rad postrojenja uz smanjenje neefikasnosti usled niskih parcijalnih opterećenja ili isključivanja i povećava nivo pouzdanosti sistema za snabdevanje toplotnom energijom [37]. Finansijske, energetske i ekološke koristi od akumulatora toplotne energije prikazane su i u radu [38].

Gustavsson i dr. [39, 40] su naglasili potrebu za sagledavanjem celokupnog životnog ciklusa prilikom procene efekata mera energetske efikasnosti u zgradama, uključujući i analizu sistema za snabdevanje energijom. Dakle, osim radne faze, koja je dominantna u pogledu potrošnje energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte, potrebno je uzeti u obzir i prikupljanje i obradu materijala, izgradnju i rušenje postrojenja, kao i odlaganje

otpada. Takođe su pokazali da daljinsko grejanje na bazi kogeneracije i toplotnih pumpi daje najbolje rezultate u pogledu potrošnje primarne energije, dok je sagorevanje biomase najpovoljnije sa stanovišta smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte.

Za potpuno ili što bolje iskorišćenje prednosti koje nude sistemi sa kogeneracijom, trigeneracijom i akumulatorima energije neophodno je njihovo pravilno projektovanje, tj. dimenzionisanje, kao i korišćenje, odnosno planiranje načina rada. Upravo tome je u ovoj disertaciji posvećena posebna pažnja jer je reč o relativno kompleksnim postrojenjima kod kojih je često teško ili gotovo nemoguće doneti najbolje odluke bez upotrebe kompleksnih matematičkih alata.

Za pravilno dimezionisanje ovakvih složenih postrojenja često se koriste tehnike optimizacije — matematičko programiranje i/ili metaheurističke metode. Takođe je veoma važno obezbediti što tačnije ulazne podatke — karakteristike komponentata sistema, procenu budućih cena energenata i predviđene potrebe korisnika za energijom.

### **2.7.2. Energetske simulacije zgrada**

Analiza implementacije sistema kogeneracije ili trigeneracije kojima se vrši energetska snabdevanje zgrada zahteva što precizniju procenu energetske potreba korisnika. Zgrade kao potrošače energije, kako stambene, tako i komercijalne, ali i bolnice, studentske domove i dr, najčešće karakterišu značajne promene energetske potreba na dnevnom, nedeljnom i godišnjem nivou. Takođe ih često karakterišu i fleksibilni sistemi za snabdevanje energijom koji su sposobni za brzo prilagođavanje promenama opterećenja u cilju zadovoljenja potreba potrošača.

Za određivanje energetske potreba korisnika, neophodnih za sprovođenje analiza, često se koriste softverska rešenja namenjena energetske simulacijama zgrada. Ovi alati su posebno pogodni u slučajevima u kojima se uzimaju u obzir dnevne i nedeljne varijacije potreba korisnika i drugih ulaznih parametara, ali se ne raspolaže relevantnim merenjima potrošnje energije zbog odsustva tehničkih uslova za merenje ili u slučajevima analiza zgrada za koje se očekuje značajna promena energetske opterećenja u bliskoj budućnosti (npr. zbog planiranih mera energetske efikasnosti na strani potrošača), odnosno zgrada koje tek treba da budu izgrađene (npr. u fazi studije izvodljivosti ili tokom projektovanja).

Trenutno je dostupno više sofisticiranih softverskih rešenja za detaljne energetske simulacije zgrada i njihovih energetske sistema kojima se mogu određivati različiti relevantni parametri: TRNSYS [41], EnergyPlus [42], eQUEST [43] i dr. Ovde neće biti vršeno njihovo poređenje niti analiza prednosti i nedostataka. Važno je naglasiti njihovu široku upotrebu u nauci i tehnicima.

Pagliarini i dr. [44] su analizirali integraciju sistema trigeneracije u sistem za snabdevanje energijom bolničkog kompleksa i koristili softver TRNSYS za određivanje potreba za grejanjem i hlađenjem dok su potrebe za električnom energijom, toplom vodom i vodenom parom utvrđene merenjima. Ascione i dr. [45] su predložili metodologiju za poboljšanje energetske efikasnosti u urbanim područjima implementacijom sistema kogeneracije i trigeneracije. Ova metodologija se zasniva na kombinovanju: geografskih informacionih sistema, modela za evaluaciju performansi zgrada i simulacija sistema za snabdevanje energijom softverom TRNSYS. TRNSYS su koristili i Chesi i dr. [46] kako bi pomoću nestacionarnog modela demonstrirali koristi od upotrebe akumulatora toplotne energije u poligeneracionom postrojenju komercijalne zgrade. Još jedan primer upotrebe ovog softvera je za poređenje energetske i eksergetске performansi različitih načina grejanja zgrada za različite klimatske uslove, koje su prikazali Gonçlaves i dr. [47]. Buonomano i dr. [48] su energetske potrebe korisnika dobili merenjima, a TRNSYS su koristili za dinamičku simulaciju sistema za snabdevanje energijom bolnice sa trigeneracijom baziranom na energiji Sunca.

Softver EnergyPlus su koristili Mago i Smith [49] i Smith i dr. [38] za određivanje toplotnih i električnih potreba komercijalnih zgrada u cilju evaluacije potencijala za smanjenje troškova rada, potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte implementacijom kogeneracije i akumulatora energije. Aste i dr. [50] su istim softverom simulirali energetske ponašanje zgrada i sistema za snabdevanje energijom sa toplotnim pumpama kako bi vrednovali ove sisteme sa aspekta primarne energije, emisije gasova sa efektom staklene bašte i troškova. Fabrizio [51] je takođe upotrebljavao EnergyPlus prilikom ispitivanja ekonomskih i energetske uticaja različitih konfiguracija bolničkih postrojenja za poligeneraciju.

Naimaster i Sleiti [52] su proučavali uticaj kogeneracije na bazi gorivnih ćelija na potrošnju energije, emisiju gasova sa efektom staklene bašte i troškove na primeru zgrade sa kancelarijama koristeći softver eQUEST. Potrošnja finalne energije u zgradama određivana je pomoću softvera ENORM u [39, 40] i VIP+ u [53, 54].

Ovako određena potreba za energijom je korišćena i za optimizaciju projektnih parametara sistema za snabdevanje energijom. Na primer, Barbieri i dr. [55] su odredili profile opterećenja softverom TRNSYS da bi na osnovu njih dimenzionisali postrojenje pomoću genetskog algoritma. Asadi i dr. [56] su takođe upotrebili TRNSYS za simulacije zgrade i sistema, a na osnovu toga vršili višekriterijumsku optimizaciju mera energetske efikasnosti omotača i načina snabdevanja koristeći veštačke neuronske mreže i genetski algoritam. Rezvan i dr. [57] su časovnu potrebu za energijom izračunali softverom EnergyPlus u cilju optimizacije projektnih parametara postrojenja.

### **2.7.3. Optimizacija energetske sistema**

Optimizacija energetske sistema je od suštinskog značaja za racionalno korišćenje prirodnih i ekonomskih resursa, kao i za smanjenje njihovih štetnih efekata na životnu sredinu [58]. Značaj efektivnosti i optimalnosti troškova mera za smanjenje potrošnje energije i uticaja na okolinu je naglašen u [17]. Prema [8, 58, 59], sveobuhvatna optimizacija sistema za snabdevanje energijom se može podeliti na tri nivoa:

- (1) optimizacija strukture postrojenja, odnosno određivanje skupa komponenti i veza između njih koji ulaze u sastav sistema,
- (2) optimizacija projektnih parametara, odnosno određivanje tehničkih karakteristika komponenata i stanja radnih fluida pri nominalnim uslovima,
- (3) optimizacija radnih parametara, odnosno određivanje trenutnih opterećenja izabranih komponenata i stanja radnih fluida.

Optimizacija strukture postrojenja i projektnih parametara je prisutna u slučajevima evaluacije projekata u okviru kojih se razmatra izgradnja novih ili rekonstrukcija postojećih postrojenja. Obično se vrši za period ne manji od jedne godine, a često se u obzir uzima ceo ekonomski ili životni vek postrojenja. Optimizacija radnih parametara se vrši za isti period kao i optimizacija strukture i projektnih parametara ukoliko je deo postupka sveobuhvatne optimizacije.

Radni parametri se mogu optimizovati i kod postojećih postrojenja, sa ciljem kratkoročnog planiranja rada sistema i pri tome se obično posmatra period od nekoliko dana. Optimizacija režima rada je npr. veoma važna komponenta modelskog prediktivnog upravljanja energetske sistema [60].

#### *2.7.3.1. Izbor kriterijuma optimizacije*

Izbor funkcije cilja, tj. kriterijuma optimizacije predstavlja jednu od najvažnijih karakteristika problema optimizacije. Kada je u pitanju optimizacija radnog režima postrojenja, izbor cilja donekle zavisi od posmatranog vremenskog perioda, posebno ako se optimizacija vrši radi postizanja što boljih finansijskih ili ekonomskih rezultata. Tada cilj može biti minimizacija varijabilnih troškova [61, 62], ili ako se posmatra period od jedne ili više godina, minimalan trošak energije ili maksimalan operativni profit [8]. Troškovi rada i održavanja se nekada uzimaju u obzir [63, 64], a nekada ne [65, 66]. U literaturi se takođe sreću i druge funkcije cilja, koje su obično u vezi sa minimalnom potrošnjom primarne energije [67, 68] ili minimalnom emisijom gasova sa efektom staklene bašte [69]. Minimizacija potrošnje primarne energije i slični ciljevi optimizacije su pogodni jer

ne zahtevaju finansijske i ekonomske ulazne parametre, npr. tarife i cene energenata, koje je često teško pouzdano predvideti i koji su specifični za posmatrane teritorije i tržišta. Pored toga, ovakve funkcije se mogu upotrebljavati za definisanje ciljeva energetske politike [70].

Funkcije cilja problema optimizacije strukture i projektnih parametara postrojenja se obično odnose na finansijske i/ili ekonomske efekte. Ukoliko se posmatra jedna godina, obično se traži rešenje koje odgovara najnižim ukupnim godišnjim troškovima [71–75] u koje ulaze nivelisani godišnji troškovi investicije, rashodi i prihodi od kupovine i prodaje energenata, i ponekad troškovi rada i održavanja. Ukupni troškovi investicije se nivelišu, tj. svode na period od jedne godine množenjem ukupne vrednosti faktorom povraćaja kapitala [71]. Ako se posmatra više godina ili ekonomski odnosno životni vek postrojenja, funkcija cilja je obično neki dinamički finansijski/ekonomski indikator, najčešće neto sadašnja vrednost [76], ali se može koristiti i interna stopa povraćaja, dinamički period povraćaja i dr. U radu [77], cilj je prinos na investiciju, dakle statički indikator. Kao i kod optimizacije radnog režima, funkcije cilja se mogu odnositi na uticaje na okolinu: potrošnju primarne energije [55, 78, 79] ili emisiju gasova sa efektom staklene bašte [80], pri čemu se mogu uračunati i uticaji koji prethode ili slede nakon faze rada postrojenja, npr. tokom izgradnje ili uklanjanja postrojenja. Kao funkcije cilja se mogu definisati i tehničke veličine kao što je eksergetski stepen korisnosti postrojenja [81, 82] ili destrukcija eksergije, ali i iskorišćenje lokalnih resursa, nivo komfora [83], emisija lokalnih zagađivača itd.

Problemi višekriterijumske optimizacije, odnosno optimizacije vektora, u opštem slučaju, imaju više izvodljivih rešenja koja se mogu smatrati optimalnim. Ovaj skup rešenja se naziva Pareto skup, a za pomenuta rešenja se kaže da su Pareto optimalna. To su ona rešenja kod kojih nije moguće poboljšati vrednost neke funkcije cilja bez istovremenog pogoršanja vrednosti jedne ili više preostalih funkcija cilja [84]. Ovakvi problemi se mogu formulirati na više načina koji se razlikuju po tome kako se uzimaju u obzir kriterijumi optimizacije. Najčešće se koristi pristup skalarizacije tj. težinskih suma prema kome se definiše jedna funkcija cilja koja je linearna kombinacija kriterijuma [85], mada je moguće kombinovanje kriterijuma izvršiti i na druge načine [21]. Slično tome, u izraz za glavni kriterijum se mogu uključiti sporedni kriterijumi, npr. u finansijsku funkciju cilja se mogu dodati i ekološki parametri izraženi korišćenjem adekvatnih penala ili taksi za emisije [86, 87]. Ovakav pristup ima nedostatak jer se može desiti da, ukoliko Pareto kriva nije konveksna, neka Pareto optimalna rešenja ne mogu biti pronađena [88]. Nekada se sporedni kriterijumi jednostavno uzimaju u obzir kroz odgovarajuća ograničenja [63, 89–91]. Naprednija varijanta ovog pristupa je metoda  $\varepsilon$ -ograničenja kod koje se jedna funkcija cilja zadržava, dok se ostale transformišu u ograničenja problema optimizacije. Pareto optimalna rešenja se dobijaju ponavljanjem procedure optimizacije

sa parametričkim promenama ovakvih ograničenja [84, 92]. Fazi pristup [93] omogućava tretiranje svih funkcija cilja kao mekih ograničenja, tj. ograničenja koje nije neophodno u potpunosti zadovoljiti, ali je njihovo zadovoljenje u što većoj meri poželjno. Nova funkcija cilja je maksimalni stepen zadovoljenja svih mekih ograničenja.

Višekriterijumska optimizacija se češće sreće kod optimizacije strukture i/ili projektnih parametara nego kada se optimizuju samo radni parametri. U literaturi se može videti više kombinacija kriterijuma optimizacije, ali je skoro uvek najmanje jedan finansijske prirode. Jedna od najčešćih kombinacija su godišnji troškovi i emisija CO<sub>2</sub> [85–87, 89, 92, 94, 95]. Takođe, u literaturi ima dosta karakterističnih kombinacija. Na primer, u radu [96] funkcije cilja su potencijal globalnog zagrevanja tokom životnog ciklusa i eksergetska efikasnost sistema za snabdevanje energijom, dok je treći kriterijum, koji se odnosi na vreme tokom koga se ne mogu potpuno zadovoljiti potrebe korisnika, posmatran kao ograničenje.

Ukoliko se optimizacija postrojenja obavlja na više nivoa [97–99] (npr. radnom i projektnom), pri čemu su funkcije cilja na različitim nivoima suprotstavljene, onda takav problem — matematički gledano — ne mora da predstavlja problem višekriterijumske optimizacije, iako ima više ciljeva, već posebnu generalizaciju problema optimizacije. Ovakvi problemi su kompleksniji i teži za rešavanje od uobičajenih sa jednim ili više kriterijuma, posebno ako se primenjuju klasične metode matematičkog programiranja.

### *2.7.3.2. Optimizacija radnih parametara*

Kada su u pitanju sistemi snabdevanja energijom sa kogeneracijom ili trigeneracijom, postoji veliki broj mogućih radnih režima, tj. kombinacija radnih parametara: praćenje električnog ili toplotnog opterećenja, rad sa punim kapacitetom, zadovoljenje baznog ili vršnog opterećenja, izbor između kompresorskih i apsorpcionih rashladnih mašina itd. Svaka analiza ekonomije sistema kogeneracije bi trebalo da uzme u obzir radne režime [7] jer troškovi rada postrojenja mogu značajno zavisiti od metode planiranja i načina rada [74]. Ovo je posebno bitno kada su u pitanju sistemi za energetske snabdevanje zgrada koje karakterišu značajne varijacije opterećenja, tj. energetske potrebe, na dnevnom, nedeljnom i godišnjem nivou [98, 99]. U radu [100] je naglašen značaj permanentne kontrole i optimizacije radnog režima za postizanje boljih ekonomskih rezultata, višeg nivoa energetske efikasnosti i smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte. Značaj implementacije i optimizacije radnog režima kogenerativnih postrojenja takođe je istaknut u [101, 102]. U članku [103] je opisan način rada i značaj optimizacije radnih parametara energetske efikasnog i sofisticiranog postrojenja za daljinsko grejanje sa kogeneracijom koje funkcioniše u uslovima liberalizovanog tržišta električne energije i u skladu sa relevantnim direktivama Evropske unije. Naime, ukoliko je tržište električne

energije liberalizovano, cena ovog energenta se stalno menja što posebno otežava planiranje rada postrojenja, pa sofisticiraniji pristupi koji uključuju optimizaciju radnih režima dodatno dobijaju na značaju.

Optimizacija radnih parametara energetske sistema je posebno važna u dva slučaja:

- (1) kada se želi odrediti radni režim postojećeg postrojenja, takav da omogući postizanje najboljih finansijskih ili nekih drugih rezultata,
- (2) u okviru optimizacije strukture postrojenja i projektnih parametara.

U literaturi se najčešće rad sistema predstavlja nizom stacionarnih stanja u diskretnim vremenskim koracima, dok se model bazira na sintetičkom pristupu crne kutije [104].

Veličine kojima se definišu radni režimi sistema za snabdevanje energijom mogu biti celobrojne, tj. binarne (0–1), kojima se definiše da li su komponente uključene ili ne, kao i kontinualne ili semi-kontinualne, kojima se kvantifikuju maseni, energetski, finansijski i drugi tokovi u postrojenju, opterećenja komponenata, termodinamičke veličine kojima se izražavaju stanja fluida u sistemu (temperatura, pritisak i sl), uticaj na životnu sredinu itd.

U literaturi postoje različiti pristupi matematičkom modeliranju sistema čije je radne parametre potrebno optimizovati. Pristup matematičkom modeliranju je uslovljen svrhom optimizacije, vrstom postrojenja, potrebom za preciznošću, kao i raspoloživim vremenom i računarskim resursima za rešavanje problema optimizacije. Problemi optimizacije zasnovani na jednostavnijim matematičkim modelima i sa manje nezavisno promenljivih veličina obično mogu biti rešeni veoma brzo primenom dobro poznatih i uobičajenih metoda kao što su metode linearnog programiranja, npr. dualna simpleks metoda ili metoda unutrašnje tačke, ili nelinearnog programiranja, npr. korišćenjem Lagrangeovih množilaca. Sa druge strane, kompleksniji modeli omogućavaju, pre svega, bolji matematički prikaz samog postrojenja, ali često i veću preciznost i logičnija rešenja problema optimizacije. Za rešavanje ovakvih problema se obično koriste metode grananja i ograničavanja ili grananja i sečenja, pa je obično potrebno više vremena i naprednija računarska oprema.

Kompleksniji i veći, a posebno nelinearni problemi se često rešavaju metaheurističkim metodama, kao što su genetski algoritmi ili optimizacija rojevima čestica. Ove metode su danas veoma popularne zahvaljujući svojim prednostima među kojima se ističu: široki opseg primene, fleksibilnost, jednostavnost softverske implementacije, jednostavnost matematičkog modeliranja zbog mogućnosti direktnog rada sa logičkim i nelinearnim relacijama, kao i implementacije numeričkih procedura itd. Metaheurističke metode se nekad koriste i umesto mešovite celobrojnog linearnog programiranja jer u nekim slučajevima — kod kompleksnih i velikih problema — mogu biti efikasnije. Značajne

su i kod problema optimizacije sa više nivoa kod kojih primena klasičnih metoda može biti veoma komplikovana. Ipak, kod njih nikada ne postoji garancija da je pronađeno tačno optimalno rešenje niti se može definisati prihvatljiva tolerancija nepreciznosti i kontrolisati greška.

Jedna od najbitnijih karakteristika svakog matematičkog modela jeste nivo aproksimacije tehničkih detalja komponenata i sistema što se pre svega odnosi na:

- razmatranje binarnih nezavisno promenljivih veličina,
- uzimanje u obzir nestacionarnog rada tokom puštanja u rad i zaustavljanja komponenata,
- tretiranje radnih karakteristika komponenata na uslovima različitim od nominalnih,
- tretiranje nelinearnih funkcija,
- određivanje gubitaka ili dobitaka toplotne energije kroz omotač akumulatora toplotne energije.

Značaj razmatranog nivoa detalja i, posledično, izbora metode optimizacije analizirani su u radovima [105, 106].

Binarnim nezavisno promenljivim veličinama se u problemu optimizacije radnog režima definiše da li je u posmatranom trenutku neka komponenta uključena ili nije. Ipak, ove veličine nisu važne samo zbog toga. Njima se, između ostalog, omogućava definisanje donje granice dozvoljenog opterećenja komponente različite od nule, odnosno ograničenja kojim se definiše da opterećenje komponente, ukoliko ona radi, ne može biti manje od pomenute granične vrednosti. Binarne veličine služe i za definisanje nekih relacija u matematičkom modelu koje se odnose na dve ili više komponenata, npr. ograničenja kojima se definiše prioritet u radu jedne komponente u odnosu na drugu. Važne su i za definisanje logičkih relacija. Ipak, mnogi autori se odlučuju za izostavljanje binarnih veličina iz matematičkih modela, jer se problemi bez njih znatno brže i lakše rešavaju.

Puštanje u rad i zaustavljanje komponenata sistema je izrazito nestacionaran proces koji nekada rezultira dodatnom potrošnjom energije i troškovima, odnosno manjom količinom proizvedene energije. U mnogim radovima ova činjenica se zanemaruje jer modeliranje ovog procesa zahteva pre svega korišćenje osnovnih, a nekada i uvođenje dodatnih binarnih nezavisno promenljivih veličina, kao i novih ograničenja, posebno ukoliko se želi mešoviti celobrojni linearni problem. Jednostavniji primeri modeliranja ovih efekata su prikazani u [65, 107], a kompleksniji u [108]. Pristup iz [109], prema kome se toplotni stepen korisnosti kogenerativne jedinice nelinearno koriguje u zavisnosti od vremena tokom koga je ona bila isključena bi se mogao upotrebiti u nekim slučajevima primene metaheurističkih metoda.

Radne karakteristike komponenata zavise od više uticajnih faktora i često odstupaju od nominalnih. Maksimalna snaga komponente može zavisiti od stanja spoljašnjeg vazduha (temperature, pritiska ili vlažnosti) ili temperature fluida na ulazu ili izlazu. Efikasnost komponente takođe može zavisiti od atmosferskih uslova, ali i njenog trenutnog opterećenja. Nivo detalja uzetih u obzir prilikom opisivanja ovih zavisnosti značajno varira u literaturi.

U matematičkim modelima se često javljaju nelinearni odnosi, posebno kada je reč o puštanju u rad i zaustavljanju, kao i radnim karakteristikama komponenata. Mnogi autori teže formulaciji linearnih ili mešovutih celobrojnih linearnih problema, pa je tada neophodno nelinearne odnose zameniti linearnim. Kada su u pitanju nelinearni odnosi između celobrojnih nezavisno promenljivih veličina, to je moguće postići bez ikakvog gubitka tačnosti, uvođenjem dodatnih celobrojnih veličina i pratećih ograničenja [21, 108]. Kod kontinualnih i semi-kontinualnih funkcija, moguće je svaku nelinearnu funkciju aproksimirati običnom ili izlomljenom linearnom. Korišćenje izlomljenih linearnih funkcija [33, 107] je kompleksnije, zahteva dodatne nezavisno promenljive veličine i ograničenja, a posledično i veće probleme optimizacije, ali pruža mogućnost obezbeđivanja velike preciznosti prilikom aproksimacije.

Matematičko modeliranje akumulatora toplotne energije, a pre svega uzimanje u obzir gubitaka ili dobitaka energije kroz omotač, zahteva određena uprošćenja, posebno ako se teži kreiranju linearnih ili mešovutih celobrojnih linearnih problema. Najpreciznije bi se ovi gubici odredili numeričkim metodama [34, 110], što na žalost nije prihvatljivo, posebno kada se koriste metode klasičnog matematičkog programiranja. Najčešće se ovi gubici, odnosno dobitci jednostavno izražavaju kao konstantan (prethodno definisani) udeo sadržaja energije u akumulatoru u određenom trenutku [33, 72, 87, 90, 91], mada su prisutni i nešto kompleksniji primeri [98, 99, 111–113].

Prilikom definisanja matematičkog modela obično se vrši diskretizacija problema po vremenu: posmatrani period se deli na vremenske korake i usvaja se pretpostavka da su ulazni parametri, kao što su cene energenata, energetske potrebe korisnika i dr, kao i opterećenja komponenata konstantni tokom vremenskog koraka. Zavisno od vrste postrojenja i potreba za preciznošću, trajanje vremenskog koraka može biti od nekoliko sekundi do nekoliko časova. U velikom broju radova se usvaja vremenski korak od 1 h.

Ako je potrebno optimizovati rad postrojenja za period od jedne ili više godina, problemi optimizacije radnih parametara postaju veliki i veoma ih je teško, mada ne i nemoguće, rešiti dovoljno brzo bez dodatnih aproksimacija. Zato se najčešće posmatrani period aproksimira sa nekoliko tipičnih perioda od kojih svaki predstavlja jedan ili više stvarnih perioda sličnih u pogledu ulaznih parametara, npr. energetske potrebe korisnika ili cena

energenata. Obično se koriste tipični dani, mada je moguće koristiti i duže periode, npr. nedelje [114]. U radovima [115, 116], predloženi su načini izbora, tj. definisanja tipičnih dana, odnosno perioda. Nasuprot ovakvom pristupu, postoje i primeri u kojima se uzima u obzir cela godina [33] ili više njih [111, 112]. U radu [33] je korišćen vremenski korak od 4 h kako bi se smanjio broj nezavisno promenljivih veličina koje se odnose na radni režim, kao i nešto jednostavniji model, dok je u [111, 112] primenjen kompleksniji matematički model, ali je vršena kratkoročna optimizacija rada postrojenja koja je ponavljana uz pomeranje perioda optimizacije. Kratkoročna optimizacija sa pokretnim periodom je primenjena i u radu [106].

Dekompozicija problema po vremenu [58] može biti efikasan način za poboljšanje efikasnosti rešavanja problema. Naime, ukoliko ne postoje ograničenja koja se odnose na ceo posmatrani period optimizacije, moguće je problem podeliti na više manjih koji se odnose na po nekoliko povezanih ili po jedan tipičan period i rešavati ih posebno. Jednostavniji problemi mogu biti rešavani za svaki vremenski korak posebno. Ipak, ukoliko se uzimaju u obzir puštanje u rad ili zaustavljanje komponenata, kao i akumulatori energije, javiće se ograničenja kojima se obuhvata više koraka. Razdvajanje povezanih ograničenja se može postići korišćenjem Lagrangeove relaksacije kojom se originalni problem razdvaja na više podproblema. Ovakav pristup je kritikovan u radu [59] jer, kako je naglašeno, može dovesti do rešenja koja su „kontroverzna“ sa energetskog aspekta, odnosno „suviše osetljiva na promene graničnih uslova“, zbog čega se dobija nedovoljno dobra reprezentacija procesa konverzije energije.

Iako postoje različiti pristupi, modeli i načini rešavanja, gotovo svim problemima optimizacije radnih parametara je zajednička karakteristika da sadrže ograničenja kojima se nameće zahtev da energetske potrebe korisnika, najčešće unapred definisane, moraju biti zadovoljene u svakom razmatranom vremenskom koraku. Pored toga, ograničenja se odnose na dozvoljene opsege opterećenja komponentata, energetske bilanse unutar sistema, zakonske odredbe, bezbednosne zahteve, dozvoljeni uticaj na okolinu itd.

Ommen i dr. [106] su sa metodološkog aspekta poredili tri najčešće korišćenja pristupa optimizaciji radnih režima energetskih sistema na primeru sistema daljinskog grejanja sa kogeneracijom: (1) pristup zasnovan na problemima linearnog programiranja, (2) pristup zasnovan na problemima nelinearnog programiranja i (3) pristup u kome se koristi mešovito celobrojno linearno programiranje. Zavisnost performansi od parcijalnog opterećenja uzeta je u obzir samo u drugom, a uticaji puštanja u rad i zaustavljanja komponentata samo u trećem slučaju. Optimizacija je vršena za jedan mesec. Pri korišćenju prvog pristupa, rađena je jedinstvena optimizacija za ceo posmatrani period, a za sva tri pristupa je vršena optimizacija korišćenjem pokretnog perioda: optimizacija se radi za period veći od 24 h, a zatim se period optimizacije pomera za 24 h. Razlika između

rezultata dobijenih korišćenjem prvog pristupa sa razmatranjem celovitog perioda i sa pokretnim periodom optimizacije je veoma mala i ovi rezultati su konzistentni sa radom [112]. To pokazuje da korišćenje pokretnog kratkog perioda optimizacije, pored toga što značajno skraćuje vreme rešavanja problema, može rezultirati veoma dobrim rešenjima, bliskim globalnom optimumu. Međutim, primećene su značajne razlike između tri pristupa, a zaključeno je da su problemi mešovito celobrojnog linearnog programiranja najpogodniji sa aspekata tačnosti i potrebnog vremena. Pored toga, prvi pristup može rezultirati rešenjima koja su u praksi neizvodljiva, tj. radom ispod dozvoljenog minimuma.

U nastavku je dat pregled radova u kojima je tema samo optimizacija radnih režima, bez optimizacije strukture i projektnih parametara.

Lozano i dr. [61, 62] su predstavili veoma jednostavan problem optimizacije radnog režima sistema trigeneracije. Sam razmatrani sistem je veoma jednostavan — sastoji se od kogenerativne jedinice, kotla, apsorpcione i kompresorske rashladne mašine. Naglašena je primena pristupa na probleme koji se odnose na energetske snabdevanje zgrada i postojanje značajnih varijacija u potrebama korisnika. Matematički model je jednostavan: stepeni korisnost i koeficijenti hlađenja su konstantni, nema celobrojnih nezavisno promenljivih veličina, a nisu uzeti u obzir ni periodi puštanja u rad i zaustavljanja komponenata. Uz to, nije predviđen ni akumulator energije. Pored očiglednih nedostataka, ovako jednostavan model ima jednu veoma važnu prednost — može se izvršiti njegova dekompozicija na časovne podprobleme, odnosno može se rešavati za svaki vremenski korak posebno, čime se znatno skraćuje potrebno vreme. Cilj optimizacije je minimizacija varijabilnih troškova. Ovaj pristup je korišćen za termo-ekonomsku analizu, tj. određivanje jediničnih troškova pojedinačnih internih tokova energije i tokova energije ka potrošačima. Takođe su određivani i marginalni troškovi. Marginalni trošak je trošak proizvodnje dodatne količine energije, tj. promena vrednosti funkcije cilja pri promeni konstante u ograničenju za jediničnu vrednost. Ilustrovan je značaj optimizacije radnih parametara, a u radu [62] je naglašeno da bi uvođenje binarnih veličina dovelo do preciznijih rezultata. Ovaj pristup su primenili i Carvalho i dr. [69], s tom razlikom što je cilj definisan kao minimizacija emisije CO<sub>2</sub>, a umesto troškova, vršena je raspodela ukupnog uticaja na životnu sredinu među tokovima energije, tj. svakom unutrašnjem ili izlaznom toku dodeljen je deo ukupne emisije. Pokazan je i značajan potencijal smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte implementacijom sistema trigeneracije i radom sistema u režimu koji odgovara najmanjoj emisiji, što, treba naglasiti, ne mora biti ekonomski povoljno niti prihvatljivo.

Lahdelma i dr. [117–119] su iskoristili specifičnu strukturu posmatranog problema linearnog programiranja i prilagodili simpleks algoritam potrebama optimizacije radnog režima kogenerativnog postrojenja za period od jedne godine. Razmatranje ne obuhvata

puštanje u rad i zaustavljanje komponenata niti skladištenje energije, pa je vršena dekompozicija problema na časovne podprobleme što za posledicu ima znatno brže i lakše rešavanje. Rong i Lahdelma [120] su koristili linearno programiranje za rešavanje problema optimizacije radnih parametara sistema trigeneracije koji je dekomponovan na časovne podprobleme sa ciljem minimizacije troškova proizvodnje energije i troškova emisije CO<sub>2</sub>. Takođe je korišćen poseban, efikasniji i pogodniji, oblik simpleks algoritma za rešavanje postavljenog problema, nastao na osnovu istraživanja strukture samog problema. Isti autori su u [121] predstavili heuristički pristup kojim se omogućava rešavanje problema za svaki korak posebno uz razmatranje ograničenja promene opterećenja kogenerativnog postrojenja u toku jednog vremenskog koraka.

U radovima [122–124] je takođe definisan problem linearnog programiranja na časovnom nivou za optimizaciju rada sistema kogeneracije i trigeneracije sa gasnim motorom, kotlom, apsorpcionom i kompresorskom rashladnom mašinom i vezom sa mrežom za distribuciju električne energije. Model je jednostavan, bez celobrojnih nezavisno promenljivih veličina i akumulatora energije, ali sa definisanim karakteristikama komponenata pri parcijalnim opterećenjima. Zapravo, celobrojne veličine su predefinisane, tj. ulazne. U radu [122], cilj je minimizacija potrošnje primarne energije sistema trigeneracije, a naglašeno je da ovako definisan problem može služiti kao sredstvo energetske politike i za identifikaciju potencijala uštede primarne energije. Vršeno je poređenje potrošnje primarne energije za razne radne režime u zimskom i letnjem periodu između razmatranog sistema i sistema koji ima kotao, kompresorsku rashladnu mašinu i vezu sa elektrodistributivnom mrežom. Pokazan je značajan potencijal za smanjenje potrošnje primarne energije. U radu [123] je tražen finansijski optimalni radni režim za 12 tipičnih dana koji predstavljaju jednu godinu i takođe konstatovan značajan potencijal za uštedu primarne energije. U radu [124] su procenjivani sledeći efekti ugradnje gasnog motora za kogeneraciju u sistem daljinskog grejanja: neto sadašnja vrednost i interna stopa povraćaja za period od 10 godina, eksergetska efikasnost, smanjenje potrošnje primarne energije i smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte. Pretpostavljen je finansijski optimalan rad postrojenja.

Åberg i dr. [125] su razmatrali uticaj promene, tj. smanjenja potrebe za toplotnom energijom na potrošnju primarne energije i emisiju gasova sa efektom staklene bašte sistema daljinskog grejanja sa kogeneracijom. Posebno je od interesa bilo ispitivanje da li će doći do fenomena porasta potrošnje primarne energije ili emisije gasova sa efektom staklene bašte usled smanjenja potrebe za grejanjem. Ovaj fenomen se javlja kada se u sistemu snabdevaja energijom nalaze kogenerativne jedinice kao što su gasni motori ili gasne turbine. Naime, smanjenjem potrebe za toplotnom energijom se prevashodno smanjuje vreme korišćenja kotlova za pokrivanje vršnih opterećenja, čime se postižu

pozitivni efekti u pogledu potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte. U manjoj meri dolazi i do redukcije korišćenja kogenerativnih jedinica za proizvodnju toplotne energije, što ima dvotruki uticaj: (1) smanjenje potrošnje goriva, a samim tim i potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte i (2) smanjenje proizvodnje električne energije, tj. količine koja se isporuči mreži, čime se, u slučaju viših faktora potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte same mreže, mogu povećati količine primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte, odnosno umanjiti pozitivni efekti kogeneracije. Ovaj fenomen je ilustrovan i u radu [112].

Precizno razmatranje radnih režima, a samim tim i utvrđivanje optimalnog načina rada postrojenja je veoma bitno pri analizi efekata promene energetske potrebe korisnika. U radu [125] je pretpostavljeno da postrojenje radi u finansijski optimalnom režimu, a problem optimizacije radnog režima je postavljen kao linearni, bez binarnih veličina. Ipak, naglašeno je da je ovakav pristup ograničavajući jer ne dozvoljava definisanje donjih graničnih vrednosti energetske tokova. Veoma značajna karakteristika primenjenog pristupa je fleksibilna diskretizacija problema po vremenu, odnosno mogućnost primene vremenskih koraka različite dužine, npr. korišćenja kraćeg koraka u periodima kada se javljaju vršna opterećenja. Zaključeno je, pored ostalog, da izbor tipa postrojenja i goriva ima suštinski uticaj na emisiju gasova sa efektom staklene bašte sistema za daljinsko grejanje, kao i da niske cene električne energije u zimskom periodu idu u prilog korišćenju toplotnih pumpi, dok više cene čine kogenerativna postrojenja poželjnijim. Sličan pristup su primenili Åberg i Henning [126] na primeru grupe stambenih zgrada priključenih na sistem daljinskog grejanja.

Cardona i dr. [63] su predstavili slučaj optimizacije radnog režima postrojenja za trigeneraciju koje snabdeva energijom aerodrom. Razmatrane su gasne turbine, kotlovi i apsorpcione rashladne mašine. Predviđeno je i skladištenje toplotne energije. Korišćeni su profili opterećenja dobijeni merenjima na samom aerodromu. Kao cilj optimizacije, menadžment aerodroma je definisao postizanje maksimalne profitabilnosti uz zadovoljenje celokupne potrebe aerodroma za energijom, dok je za smanjenje potrošnje primarne energije i emisije zagađivača korišćena manje određena formulacija, tj. zahtevano je da budu „značajni“. Ovo je zapravo tipična formulacija funkcije cilja kada su investitori okrenuti prema profitu. Zbog postojanja jasne hijerarhije ciljeva, autori su kao funkciju cilja definisali profit, dok su primarna energija i emisija zagađivača uzeti u obzir i kontrolisani ograničenjima. Funkcija cilja je postizanje minimalnih godišnjih troškova goriva, rada i održavanja sistema za snabdevanje energijom. Definisan je linearni problem kome je dodato još nekoliko pravila rada, pre svega u vezi sa rasporedom uključivanja i isključivanja komponenata. Nisu uzeti u obzir potrošnja energije i dodatni troškovi

usled puštanja u rad i zaustavljanja komponenata. Predstavljena je grupa karakterističnih ograničenja koja se odnose na maksimalnu dozvoljenu promenu nivoa opterećenja komponenata u toku jednog vremenskog koraka od 1 h. Zaključeno je da bi optimizacija orijentisana isključivo prema profitu dala loše rezultate u pogledu uštede primarne energije i emisije zagađivača, ali da bi bilo moguće značajno poboljšati ove efekte ukoliko bi se radni parametri malo modifikovali.

Chicco i Mancarella [127] su koristili teoriju grafova i metodu sekvencijalnog kvadratnog programiranja prilikom nelinearne optimizacije radnog režima sistema trigeneracije. Ipak, u poslednje vreme se sve ređe pribegava klasičnom matematičkom programiranju za rešavanje nelinearnih i posebno mešovutih celobrojnih nelinearnih problema, već se uglavnom koriste metaheurističke tehnike.

Sakawa i Matsui [93] su definisali nelinearni problem i primenili metodu optimizacije rojevima čestica za višekriterijumsku optimizaciju radnog režima postrojenja za daljinsko grejanje i hlađenje. Period optimizacije je jedan dan, podeljen na 24 koraka od po 1 h. Razmatrano je postrojenje za daljinsko grejanje i hlađenje koje se sastoji od kotlova, apsopcioni i kompresorskih rashladnih mašina, izmenjivača toplote itd. Radne karakteristike specifične za parcijalna opterećenja su uzete u obzir samo kod oba tipa rashladnih mašina i to kao izlomljene prave linije. Prilikom određivanja troškova rada, uzeto je u obzir uključivanje i isključivanje komponenata. Ciljevi višekriterijumske optimizacije su dobijanje najmanjih troškova rada i najmanje potrošnje energije sistema, a sam višekriterijumski problem tretiran je korišćenjem fazi programiranja.

Sakawa i dr. [65] su problem planiranja radnog režima sistema za daljinsko grejanje i hlađenje, veoma sličan kao u radu [93], rešavali na karakterističan način. Cilj optimizacije su minimalni troškovi energenata. Razmatrani sistem služi za grejanje i hlađenje bolnice, hotela, škole i kancelarijskog prostora. Sistem se sastoji od sledećih komponenata: tri parna kotla, šest kompresorskih i četiri apsorpzione rashladne mašine. Nije predviđena kogeneracija, niti bilo kakav način dobijanja električne energije osim preuzimanja iz mreže. Takođe nisu predviđene komponente za skladištenje energije. Uzima se u obzir linearna zavisnost performansi komponenata od trenutnog opterećenja. Rad komponenata je smatran stacionarnim u vremenskim koracima od po 1 h. Uzeto je u obzir da puštanje u rad i zaustavljanje komponenata rezultira dodatnim troškovima, ali ne i dodatnom potrošnjom energije. Razmatran je samo jedan prethodni period. Ipak, konstatovano je da puštanje u rad i zaustavljanje komponenata rezultira i većim utroškom energije, što nije prikazano u matematičkom modelu. Formulisan je mešoviti celobrojni linearni problem. Nezavisno promenljive veličine koje karakterišu rad komponenata u različitim vremenskim intervalima su međusobno spregnute zbog razmatranja puštanja u rad i zaustavljanja komponenata, pa nije izvršeno razlaganje problema na više manjih

bez dodatnih pojednostavljenja. Za rešavanje problema su korišćena tri pristupa:

- (1) klasičan pristup koji podrazumeva primenu metode grananja i ograničavanja,
- (2) uprošćenje problema tako što bi se zanemarili troškovi puštanja u rad i zaustavljanja komponenata, a problem razložio na više manjih — po jedan za svaki posmatrani vremenski interval, koji bi se brzo rešili metodom grananja i ograničavanja,
- (3) nalaženje približnog rešenja kombinovanjem genetskih algoritama i linearnog programiranja, pri čemu se binarne nezavisno promenljive veličine određuju genetskim algoritmom, a prilikom svakog određivanja vrednosti funkcije cilja genetskog algoritma, za zadate vrednosti binarnih promenljivih, rešava se linearni podproblem, pogodan za razlaganje, i određuju vrednosti realnih veličina.

Kod manjih problema (sa po 138 realnih i binarnih nezavisno promenljivih veličina) poređeni su prvi i treći pristup. Oba su rezultirala istom (tačnom) vrednošću, ali se metod grananja i ograničavanja pokazao efikasnijim. Kod većih problema (po 276 realnih i binarnih veličina) su takođe poređeni prvi i treći pristup. Metod grananja i ograničavanja nije uspeo da završi rad za 2 h, dok genetski algoritam jeste za znatno kraće vreme. Konačno, kod najvećih razmatranih problema (po 552 realne i binarne veličine), prvim pristupom se nije moglo naći nikakvo izvodljivo rešenje za 2 h, dok je drugi pristup rezultirao lošijom vrednošću funkcije cilja i dužim vremenom rada od trećeg pristupa, kao i neuobičajenim planom rada koji podrazumeva često uključivanje i isključivanje komponenata. Zaključeno je sledeće:

- plan rada dobijen rešavanjem problema u kome se nezavisno posmatra svaki vremenski korak je manje praktičan i ekonomičan od rešenja dobijenog rešavanjem originalnog problema,
- kod velikih problema metod grananja i ograničavanja zahteva mnogo vremena za rešavanje problema, ili se njegovom primenom uopšte ne može naći rešenje u prihvatljivom vremenskom intervalu i
- primena pomenutog metoda na bazi genetskih algoritama se pokazala praktičnom i efikasnom zbog brzog nalaženja približnog rešenja velike tačnosti.

U radu [128] je primenjen pristup sličan kao u [65]. Traženo je finansijski optimalno rešenje problema optimizacije radnog režima sistema trigeneracije za četiri tipična dana kojima je predstavljena jedna godina. Postrojenje je kompleksnije nego u radu [65] jer se razmatra i akumulator toplotne energije i veza sa mrežom za distribuciju energije. Korišćene su kombinacije genetskih algoritama i linearnog programiranja, simuliranog kaljenja i linearnog programiranja, kao i klasično mešovito celobrojno linearno programiranje. Isto rešenje je dobijeno korišćenjem sva tri pristupa.

González-Monroy i Córdoba [129] su upoređivali performanse dveju varijanti metode simuliranog kaljenja: kontinualne i diskretne, prilikom optimizacije sistema snabdevanja energijom i zaključili da je lakše definisati kontinualan problem, ali se korišćenjem diskretne metode problem brže rešava i češće dobija bolje rešenje.

Osim genetskih algoritama, optimizacije rojevima čestica i simuliranog kaljenja, za optimizaciju radnih parametara energetske sistema korišćena je i metoda harmonijske pretrage u kontinualnom obliku [130, 131].

Ipak, čini se da u literaturi ubedljivo najveću popularnost imaju tehnike mešovito celobrojnog linearnog programiranja, tj. metoda grananja i ograničavanja odnosno grananja i sečenja. Ove metode u poslednje vreme konstantno dobijaju na važnosti zbog značajnih napredaka u pogledu brzine i broja jezgara računarskih procesora, kao i poboljšanja algoritama. Naime reč je o algoritmima koji su izuzetno pogodni za paralelno izvršavanje na više jezgara. Posledica toga je mogućnost rešavanja velikih problema u relativno kratkom roku sa dostupnim računarskim resursima, što je pre samo 10–15 godina bilo gotovo nezamislivo. Sa tog aspekta se mogu posmatrati zaključci iz radova [65, 128] koji idu u korist metaheurističkih metoda: napretkom računara i algoritama, razlika između efikasnosti mešovito celobrojnog linearnog programiranja i metaheurističkih metoda se menja u korist prvog, ali još uvek ima mnogo problema koji su suviše veliki i kompleksni da bi se rešavali klasičnim metodama.

Sveobuhvatan pristup matematičkom modeliranju sistema za snabdevanje energijom sa kogeneracijom koji se koriste u uslovima liberalizovanog tržišta električnom energijom definisali su Dvořák i Havel [107]. Metodologija se bazira na korišćenju mešovito celobrojnog linearnog programiranja i namenjena je kako kratkoročnim, tako i srednje- i dugoročnim problemima optimizacije radnog režima sa ciljem maksimizacije profita. Predviđeno je uzimanje u obzir troškova vezanih za puštanje u rad i zaustavljanje komponenata, ograničavanje broja vremenskih koraka tokom kojih komponente rade ili ne rade, aproksimacija nelinearnih funkcija izlomljenim linearnim, definisanje prioriteta komponenata, pre svega radi izbegavanja pojave simetrije u matematičkom modelu, podela razmatranog perioda optimizacije u slučajevima problema srednjeročnog i dugoročnog planiranja radi skraćivanja vremena rešavanja problema itd. Takođe je istaknuto da mala dozvoljena tolerancija greške u postupku mešovito celobrojnog linearnog programiranja može značajno smanjiti potrebno vreme za rešavanje problema.

Kjeldsen i Chiarandini [132] su predložili i proučavali nekoliko zanimljivih heurističkih pristupa za definisanje i poboljšanje polaznog rešenja pri optimizaciji radnih parametara kogenerativnih postrojenja za period od jedne godine korišćenjem mešovito celobrojnog linearnog programiranja. U obzir su uzete celobrojne i kontinualne nezavisno promenljive

veliĉine, kao i troškovi puštanja u rad postrojenja. Takođe je razmatrano ograniĉenje potrošnje biomase kao primer ograniĉenja koje se odnosi na celu godinu. Heuristiĉke tehnike definisanja polaznog rešenja se zasnivaju na:

- podeli problema na kraće vremenske periode, rešavanju više manjih podproblema mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem i objedinjavanju rešenja,
- definisanju redosleda, tj. prioriteta ukljuĉivanja i iskljuĉivanja komponenata,
- rešavanju linearnog problema dobijenog relaksacijom originalnog i definisanjem celobrojnih nezavisno promenljivih veliĉina na bazi dobijenog rešenja,
- korišćenju Lagrangeove relaksacije.

Tako dobijena polazna rešenja se mogu dalje poboljšati:

- stohastiĉkim lokalnim pretraživanjem,
- lokalnim pretraživanjem korišćenjem mešovitog celobrojnog programiranja,
- rešavanjem linearnog problema i određivanjem kontinualnih nezavisno promenljivih veliĉina za fiksne zadate vrednosti celobrojnih veliĉina.

Steen i dr. [113] su predložili poboljšanje matematiĉkog modela akumulatora toplotne energije kako bi se omogućilo razmatranje višeslojnih akumulatora i preciznija procena gubitaka energije u okolinu, dok bi model ostao pogodan za implementaciju kod problema mešovitog celobrojnog linearnog programiranja. Uz to, ovaj model dozvoljava razmatranje niskotemperaturnog punjenja akumulatora toplotnim pumpama. To je postignuto modeliranjem i zasebnim razmatranjem dve individualne sekcije akumulatora — sekcije visoke i niske temperature — od kojih je svaka predstavljena kao stratifikovani sud sa dva temperaturna sloja.

U radu [133] je vršena optimizacija radnog režima postrojenja za daljinsko grejanje sa gasnim motorima ili turbinama za kogeneraciju, kotlovima, akumulatorom toplotne energije i vezom sa elektrodistributivnom mrežom radi poređenja razliĉitih kombinacija ovih komponentata. Problem mešovitog celobrojnog linearnog programiranja je rešavan metodom grananja i seĉenja za 21 tipičan dan godišnje sa korakom od 1 h. Razmatran je period od 20 godina. Matematiĉka formulacija je detaljna, sa uticajem puštanja u rad i zaustavljanja komponenata i njihovim karakteristikama koje zavise od opterećenja i parametara okolnog vazduha. Kao funkcija cilja su korišćeni varijabilni troškovi sistema, tj. energenata i rada i održavanja, osim u sluĉajevima kada je procenjivan potencijal uštede primarne energije, kada je korišćena potrošnja primarne energije. Iako su analizirani struktura i projektni parametri postrojenja, ovi parametri nisu određivani optimizacionim metodama, već su razmatrane sve moguće kombinacije. Rešenja su poređena sa aspekta jedniĉnih troškova toplotne energije i potrošnje primarne energije.

Wille-Hausmann i dr. [134] su koristili mešovito celobrojno linearno programiranje za kratkoročnu optimizaciju radnih parametara sistema sa kogeneracijom, kotlovima i akumulatorom toplotne energije. Pretpostavljeno je da motori za kogeneraciju uvek rade sa nominalnim opterećenjem, dok kotlovi mogu da menjaju opterećenje, ali im je stepen korisnosti konstantan. Uticaj puštanja u rad i zaustavljanja komponenata na energetske ili novčane tokove nije uzet u obzir, ali jesu binarne nezavisno promenljive veličine. Takođe su zadata ograničenja minimalnog broja koraka tokom kojih one mogu biti uključene ili isključene. Gubici akumulatora toplotne energije kroz omotač su smatrani konstantnim, a uzeti su u obzir i gubici usled punjenja i pražnjenja, proporcionalni odgovarajući količinama toplotne energije. Period optimizacije je sedam dana, a cilj maksimalan profit, pri čemu su uzeti u obzir prihodi od prodaje toplotne i električne energije, kao i troškovi goriva, rada i održavanja. Analiza na nivou jedne godine je pokazala da je samo optimizacijom rada moguće smanjiti troškove za oko 10 %.

Na sličan način se definišu i rešavaju problemi optimizacije radnih parametara mikro-kogenerativnih postrojenja. Wakui i dr. [67, 68] su koristili mešovito celobrojno linearno programiranje i potrošnju primarne energije kao funkciju cilja za optimizaciju rada mikro postrojenja kojima se snabdevaju male stambene jedinice.

Bracco i dr. [64] su definisali i rešavali problem kratkoročne optimizacije radnog režima poligeneracionog postrojenja. Najvažnije komponente postrojenja su: dve gasne mikro-turbine za kogeneraciju, gasni kotlovi, akumulator toplotne energije, apsorpciona rashladna mašina, koncentrišuće solarne jedinice povezane sa Stirling motorima, akumulator električne energije, fotonaponske ćelije i stanice za punjenje baterija električnih vozila. Period optimizacije je jedan dan, a cilj minimizacija ukupnih troškova rada. Matematički model je relativno kompleksan jer se uzimaju u obzir binarne nezavisno promenljive veličine, kao i zavisnost performansi mikro-turbina od temperature okoline i parcijalnog opterećenja. Poređena su tri scenarija: (1) bez poligeneracionog postrojenja, tj. samo sa kotlovima i vezom sa mrežom za distribuciju električne energije, (2) sa poligeneracionim postrojenjem, ali bez optimizacije radnih parametara i (3) sa optimizovanim poligeneracionim postrojenjem. Rezultati su pokazali da se ugradnjom poligeneracije može postići smanjenje troškova, ali da je ušteda skoro dvostruko veća ukoliko se optimizuje rad postrojenja. Smanjenje potrošnje primarne energije i emisije CO<sub>2</sub> postiže se samo u scenariju sa optimizacijom.

Kalina i Skorek [66] su optimizovali radne parametre unapred zadatog postrojenja za kogeneraciju sa gasnim motorom, gasnim kotlovima, akumulatorom toplotne energije i dvosmernom vezom sa elektrodistributivnom mrežom, sa ciljem minimizacije varijabilnih troškova energenata. Razmatrano postrojenje je projektovano za snabdevanje energijom tri objekta: dve škole i bazena. Period optimizacije je jedan dan, a vremenski korak

15 min. Uzete su u obzir karakteristike komponenata pri parcijalnim opterećenjima, kao i binarne nezavisno promenljive veličine. Formulisan je problem mešovito celobrojnog nelinearnog programiranja koji je rešavan genetskim algoritmima.

Wolfrum i dr. [135] su predstavili pristup kratkoročnoj optimizaciji radnih parametara postrojenja sa kogenerativnom jedinicom pogodan za uključivanje u proces regulacije rada sistema. Cilj je minimizacija varijabilnih troškova. Problem je u osnovi mešoviti celobrojni nelinearni, ali je predstavljen kao problem dinamičkog programiranja. Model uzima u obzir puštanje u rad i zaustavljanje komponente, kako putem efekta termičke inercije kroz korekciju dobijene toplotne energije, tako i kroz troškove smanjenja životnog veka usled puštanja u rad. Pri tome se razlikuju dva stanja zavisno od vremena mirovanja: (1) hladne i (2) tople komponente. Predviđena je i opcija ponovne optimizacije u slučaju da dođe do lošeg predviđanja ulaznih parametara kao što su klimatski uslovi ili tržišna cena električne energije, ukoliko to tržišni uslovi dozvoljavaju (npr. ukoliko postrojenje ne funkcioniše u okviru tržišta na kome se prodaja ugovara jedan dan unapred).

Dok je u prethodnim radovima fokus na radnim režimima pojedinačnih postrojenja, Nabona i Pagès [136] su predložili proceduru za kratkoročno planiranje (do sedam dana unapred) u kojoj se uzimaju u obzir svi učesnici aukcije na liberalizovanom tržištu električne energije.

### *2.7.3.3. Optimizacija strukture i projektnih parametara*

Struktura postrojenja se definiše skupom strukturnih nezavisno promenljivih veličina koje mogu biti:

- binarne, kojima se određuje da li neka komponenta, veza među komponentama, odnosno tok energije ulazi u sastav postrojenja ili ne,
- celobrojne, kojima se određuje koliko komponentata određenog tipa ili modela ulazi u sastav postrojenja,
- kontinualne, kojima se određuje nominalni kapacitet komponente i koje se mogu smatrati veličinama strukture ukoliko impliciraju da li su komponente ili veze prihvatljive ili ne — često vrednost 0 znači da komponenta nije u sastavu postrojenja.

Nezavisno promenljive veličine koje se odnose na projektne parametre postrojenja se najčešće odnose na tehničke specifikacije komponenata. To su: nominalni kapaciteti komponenata, maseni i energetske tokovi, kao i stanja radnih fluida (pritisak, temperatura i dr) pri nominalnim uslovima itd. Ove veličine se mogu definisati kao diskretne ili kontinualne. Kada je izbor komponenata postrojenja u pitanju, njihova priroda je uglavnom diskretna — postoji ograničen izbor konkretnih tipova i modela koji se mogu

implementirati — ali se zbog jednostavnosti ili bržeg rešavanja problema često formulišu kao kontinualne (npr. kapacitet komponente).

Kada je reč o problemima optimizacije sistema za energetska snabdevanja zgrada manjih i srednjih snaga, oni se uglavnom rešavaju koristeći jedan od dva pristupa:

- (1) pristup baziran na heurističkom ili metaheurističkom pretraživanju zadatah opcija,
- (2) pristup zasnovan na korišćenju nadstrukture postrojenja koja se u postupku optimizacije redukuje na optimalnu strukturu.

Prvi pristup podrazumeva određivanje vrednosti funkcija cilja za veliki broj različitih ispitivanih vektora nezavisno promenljivih veličina, često izabranih korišćenjem stohastičkih operacija. Na osnovu iskustva ili neke usvojene, najčešće jednostavne logike, teži se biranju boljih vektora i eventualno konvergenciji ka optimalnom rešenju. Prednosti ovog pristupa su jednostavnost i efikasnost, tj. brzina, a nedostatak činjenica da se ne može garantovati da je pronađeno optimalno rešenje, već se često događa da se dobiju dovoljno dobra rešenja bliska optimalnim.

Kod drugog pristupa je potrebno definisati nadstrukturu postrojenja, tj. strukturu u koju su uključene sve razmatrane komponente i moguće veze među njima. Postupkom optimizacije se bira koje će se komponente i veze izabrati, a koje će se eliminisati, što se definiše strukturnim nezavisno promenljivim veličinama. Ovaj pristup je precizniji i mogu se koristiti metode kojima se garantuje nalaženje tačnog rešenja, kao i približnog u okviru zadate tolerancije greške, pre svega mešovito ceobrojno linearno programiranje. Sa druge strane, definisani problemi su često veoma veliki zbog kompleksnih nadstrukture, pa je potrebno dosta vremena za njihovo rešavanje.

Treba naglasiti da ne postoji stroga granica između ovih pristupa, kao i da se mogu kombinovati [58]. To su pokazali Petruschke i dr. [137] koristeći heurističku predselekciju tehnologija koje će biti obuhvaćene nadstrukturom, a zatim definišući problem optimizacije baziran na nadstrukтури koju čine samo obećavajuće tehnologije. Ovakav problem, definisan na redukovanoj nadstrukтури, je znatno manji od problema koji bi se dobio bez prethodne eliminacije nekih komponenata.

Značajan aspekt definisanja i rešavanja problema optimizacije sistema za snabdevanje energijom je dekompozicija, tj. razdvajanje problema na više manjih koji se mogu zasebno rešavati. Prema [58], posebno su značajne dekompozicija po vremenu, kao i fizička i strukturna dekompozicija. Vremenska dekompozicija podrazumeva podelu problema na više manjih koji odgovaraju određenim intervalima i uglavnom se odnosi na radne režime. Fizičkom dekompozicijom se sistem razlaže na više manjih podsistema — komponenata ili podkomponentata — koji se posebno razmatraju. Konceptualna dekompozicija je podela

problema optimizacije prema nivoima, pri čemu se najčešće problemi nižeg nivoa, npr. optimizacije radnih parametara, posmatraju kao podproblemi u okviru problema višeg nivoa — optimizacije strukture i projektnih parametara. Postupak optimizacije se često bazira na iterativnim procedurama i naizmeničnom rešavanju problema različitih nivoa.

U cilju smanjenja veličine problema, tj. njegovog efikasnijeg rešavanja, pored dekompozicije ili u cilju njenog omogućavanja, mnogi autori uvode određena uprošćenja. Najčešća uprošćenja u vezi sa optimizacijom radnih parametara su već razmatrana. Ponekad je prihvatljivo da se unapred definiše struktura, pa se određuju samo projektni parametri. Na taj način se izbegava korišćenje značajnog broja binarnih ili celobrojnih nezavisno promenljivih veličina. Kao što je već napomenuto, projektne nezavisno promenljive veličine se ponekad predstavljaju kao kontinualne, iako je njihova prava priroda diskretna. Ovo je posebno zastupljen način tretiranja kapaciteta komponenata. Osim toga, moguće je koristiti aproksimirane zajedničke, najčešće kontinualne, zavisnosti cena od kapaciteta ili performansi od opterećenja za više komponenata [81], čime se dobijaju znatno jednostavniji problemi, ali se umanjuje tačnost i onemogućava uzimanje u obzir individualnih karakteristika komponenata. Prilikom optimizacije sistema sa kogeneracijom i trigeneracijom snaga od nekoliko kilovata do nekoliko megavata, najčešće se razmatraju standardizovane komponente, pa je moguće delimično ili potpuno izbeći upotrebu nezavisno promenljivih veličina koje se odnose na stanja fluida, kako pri nominalnim, tako i pri radnim uslovima. Ipak, neki parametri su veoma bitni, pa tako npr. temperatura toplog fluida na ulazu značajno utiče na kapacitet apsorpcionih rashladnih mašina, a temperatura medijuma akumulatora toplotne energije na gubitke ili dobitke energije kroz njegov omotač.

Prilikom optimizacije strukture i/ili projektnih parametara ponekad se radni režimi unapred zadaju [55, 77] ili uopšte ne razmatraju [96], ali će se u nastavku pažnja posvetiti uglavnom problemima i pristupima koji uključuju određivanje radnih parametara, jer je usvojen osnovni koncept iz [138] po kome se optimalni projektni parametri mogu odrediti samo na bazi realističnih radnih režima dobijenih optimizacijom na časovnom nivou.

Linearno programiranje se koristi i kod optimizacije projektnih parametara kada su modeli jednostavni [76, 89].

Aki i dr. [89] su primenili linearno programiranje za višekriterijumsku optimizaciju projektnih i radnih parametara sistema za snabdevanje gasom i električnom energijom, grejanje i hlađenje male urbane oblasti u kojoj ima stambenih i komercijalnih objekata. Razmatrana su individualna i centralno postrojenje sa kogeneracijom. Skladištenje energije, kao i predaja električne energije distributivnoj mreži nisu uzeti u obzir, a performanse komponenata su smatrane konstantnim. Ciljevi optimizacije su minimalna

emisija CO<sub>2</sub>, predstavljena adekvatnim ograničenjima, i minimalni troškovi energenata za potrošače, tretirani kao klasičan cilj optimizacije. Analiza je zasnovana na tri tipična dana od kojih je svaki podeljen na šest četvoročasovnih intervala. Definisani podproblemi su prikazani pomoću tri linearna modela: po jedan za centralno postrojenje, stambene i poslovne korisnike. Zaključeno je da striktna ograničenja emisije CO<sub>2</sub> uzrokuju visoke troškove za potrošače, kao i da bi zahtevi za njenim smanjenjem samo na strani potrošača takođe doveli do znatno većih troškova za njih, pa je neophodno kombinovati mere na strani proizvođača i potrošača.

Magnani i dr. su prikazali još jedan primer primene linearnog programiranja [76], gde je tražena najveća neto sadašnja vrednost implementacije sistema trigeneracije za snabdevanje komercijalne zgrade i ispitivana isplativost kogeneracije za različite vrednosti finansijskih parametara. Optimizacija projektnih i radnih parametara je zasnovana na 12 tipičnih dana od kojih po šest predstavljaju prvu i drugu dekadu rada postrojenja. Rezultati su pokazali da sistemi sa kogeneracijom mogu biti optimalno rešenje za široke opsege cena energenata, ali pod uslovom da su pravilno projektovani tako da budu adaptivni i vođeni prema rezultatima optimizacije radnih režima.

Mešovito celobrojno linearno programiranje je jedna od najzastupljenijih tehnika za rešavanje problema optimizacije strukturnih projektnih i radnih parametara sistema za snabdevanje energijom. Koristi se, između ostalog, kod pristupa zasnovanih na nadstrukturi postrojenja.

Tipičan primer integrisanog pristupa sveobuhvatnoj optimizaciji energetskih sistema prikazali su Lozano i dr. [71]. Polazi se od nadstrukture postrojenja i istovremeno se, korišćenjem mešovitog celobrojnog linearnog programiranja, određuju optimalni strukturni, projektni i radni parametri. U ovom slučaju, matematički model sadrži samo strukturne celobrojne nezavisno promenljive veličine kojima se definišu tipovi i broj izabranih komponenata sistema. Fizičke i ekonomske promenljive su prikazane kontinualnim funkcijama. Metodologija je namenjena optimizaciji sistema trigeneracije u tercijarnom sektoru, a primenjena na primeru bolnice, koristeći 24 tipična dana, po jedan za svaki mesec i svaki radni odnosno neradni dan, i vremenski korak od 1 h. Nadstruktura obuhvata komponente kao što su gasni motori i gasne turbine za kogeneraciju, kao i kotlovi, apsorpcione i kompresorske rashladne mašine i rashladni tornjevi, dok skladištenje energije nije predviđeno. Cilj optimizacije su najmanji ukupni godišnji troškovi. U obzir su uzeta i zakonska ograničenja. Veoma slična metodologija je primenjena za sistem za snabdevanje energijom stambenih zgrada u [72] sa posebno naglašenim zakonskim pravilima i ograničenjima. Pored kogenerativnih jedinica — gasnih motora i turbina — razmatrani su kotlovi, kompresorske i apsorpcione rashladne mašine, rashladni tornjevi i topli i hladni akumulatori energije.

Sličan model su koristili Casisi i dr. [73] za optimizaciju sistema kogeneracije za snabdevanje zgrada u urbanom području. Kao opcije su razmatrani gasni motor za centralizovano snabdevanje i mikroturbine koje bi bile instalirane u pojedinačnim zgradama, kao i odgovarajuća distributivna mreža. Cilj su takođe bili minimalni ukupni godišnji troškovi. Korišćene su i binarne promenljive za definisanje radnih režima. Rezultati su pokazali da su mikroturbine adekvatnije za smanjenje emisije CO<sub>2</sub>, dok centralizovano postrojenje sa gasnim motorom može da obezbedi značajnije smanjenje potrošnje primarne energije.

Carvalho i dr. [80] su koristili pristup i slučaj bolnice iz rada [71] za optimizaciju strukture, projektnih i radnih parametara postrojenja trigeneracije. U obzir je uzet ceo životni ciklus postrojenja, a tri funkcije cilja su: (1) ukupni godišnji troškovi, (2) emisija CO<sub>2</sub> i (3) eko-indikator 99. Eko-indikator 99 predstavlja globalni indikator uticaja na životnu sredinu podeljenih u tri kategorije: (1) ljudsko zdravlje, (2) kvalitet ekosistema i (3) resursi planete Zemlje. Kriterijumi koji se odnose na uticaj na životnu sredinu — emisija CO<sub>2</sub> i eko-indikator 99 — procenjeni su za period od jedne godine i matematički formulisani analogno ukupnim godišnjim troškovima. To znači da je u obzir uzeta komponenta koja se odnosi na jednogodišnji rad postrojenja i komponenta koja se odnosi na efekte koji nastaju tokom životnog ciklusa i prethode puštanju u rad ili slede nakon radnog veka. Ovi efekti su svedeni na jednu radnu godinu pomoću odgovarajućih nivelacionih faktora, analogno nivelaciji investicije korišćenjem faktora povraćaja kapitala kod godišnjih troškova. Korišćenjem oba kriterijuma uticaja na okolinu došlo se do sličnih optimalnih struktura koje uključuju kotlove i kompresorske rashladne mašine, dok je finansijski kriterijum rezultirao postrojenjem sa kogeneracijom i apsorpcionim hlađenjem. Iz analize osetljivosti je zaključeno da prihvatljivost kogeneracije sa aspekta emisije CO<sub>2</sub> značajno zavisi od karakteristika elektroenergetskog sistema i goriva koje se koristi. Pokazano je da energetska najefikasnija rešenja nisu uvek ona koja imaju najbolji uticaj na okolinu. U radu [92] je prikazana višekriterijumska optimizacija slučaja iz [80] korišćenjem metode  $\varepsilon$ -ograničenja. U prvom slučaju funkcije cilja su ukupni godišnji troškovi i emisija CO<sub>2</sub>, a u drugom ukupni godišnji troškovi i eko-indikator 99. Rešenja su predstavljena u formi Pareto skupova, a ispitivana je i njihova pojedinačna sposobnost zadržavanja iste optimalne strukture sa promenom  $\varepsilon$ -ograničenja i radnih parametara.

Oh i dr. [74] su predstavili metod optimizacije projektnih parametara i radnih režima sistema trigeneracije sa ciljem smanjenja ukupnih godišnjih troškova. U razmatranje se uzima jedna tipična godina sa 12 tipičnih dana i vremenskim korakom od 1 h. Kasnije su na osnovu dobijenih minimalnih troškova procenjeni ekonomski parametri za životni vek komponenata, tj. 15 godina. Razmatran je sistem za snabdevanje energijom bolnice i grupe stambenih objekata koji se sastoji od gasnih motora za kogeneraciju, kotlova,

kompresorskih rashladnih mašina i apsorpcionih rashladnih mašina, kako onih koje koriste vodenu paru, tako i sa sagorevanjem. Nije predviđeno skladištenje energije, kao ni izvoz električne energije. Korišćene su binarne promenljive za prikazivanje da li komponente sistema rade ili ne, ali nisu razmatrani nestacionarni režimi puštanja u rad i isključivanja komponenata. Ograničenja se uglavnom odnose na zadovoljenje unapred definisanih potreba korisnika, kao i na relacije između promenljivih. Sličan pristup je korišćen u radu [75] za procenu potencijala uštede energije i ekonomskih koristi od implementacije kogeneracije u cilju snabdevanja stambenih objekata. Procenjeni potencijal smanjenja potrošnje fosilnih goriva je oko 30 %.

Arcuri i dr. [139] su prikazali pristup optimizacije projektnih i radnih parametara sistema trigeneracije na primeru bolničkog kompleksa. Razmatrane su konfiguracije postrojenja samo sa kogeneracijom, tj gasnim motorima ili turbinama, kao i sa kogeneracijom i kompresorskim i apsorpcionim toplotnim pumpama koje rade zimi u režimu grejanja, a leti u režimu hlađenja. Nije predviđeno skladištenje energije. Kod optimizacije projektnih parametara cilj je postizanje najveće neto sadašnje vrednosti za period od 15 godina. Maksimalni godišnji profit za svaku posmatranu godinu se koristi za određivanje neto sadašnje vrednosti. Posmatrani su profili opterećenja za šest tipičnih dana u godini: po jedan radni i jedan neradni dan u toku zimskog, letnjeg i prelaznog dela godine. Vremenski korak je 2 h. Performanse komponenata su smatrane konstantnim, a od binarnih promenljivih su korišćene samo one koje pokazuju da li su sistemi kogeneracije uključeni. Problem je definisan kao mešoviti celobrojni linearni nakon odgovarajućih transformacija radi izbegavanja nelinearnih članova i rešavan metodom grananja i ograničavanja. Ovde se javlja i zakonsko ograničenje vezano za politiku cena i korišćenja obnovljivih izvora energije koje onemogućava rešavanje problema za svaki vremenski korak posebno. Primećeno je da su se motori pokazali isplativijim od turbinskih postrojenja, kao i da se sprega dva motora jednakih snaga pokazala dobrim kompromisom fleksibilnosti i kompleksnosti. Takođe je zaključeno da su se rešenja sa dvostepenim apsorpcionim mašinama pokazala manje isplativim od onih sa jednostepenim zbog veće investicije, ali i činjenice da mogu samo delimično koristiti toplotnu energiju dobijenu u motorima. Naglašena je neophodnost optimizacije ovakvih postrojenja, značaj korišćenja toplotnih pumpi spregnutih sa kogeneracijom, kao i mogući pozitivni ekonomski, energetske i ekološki efekti optimizovanih postrojenja sa kogeneracijom i toplotnim pumpama.

Safaei i dr. [140] su koristili mešovito celobrojno linearno programiranje za optimizaciju sistema za snabdevanje energijom komercijalne zgrade sa trigeneracijom i solarnim termičkim i fotonaponskim panelima. Cilj je minimizacija ukupnih diskontovanih troškova tokom životnog ciklusa, a kao rezultat je dobijen optimalan plan investicija u komponente energetskog sistema tokom razmatranog perioda od 11 godina i optimalni radni režimi

sistema. Razmatrana je i mogućnost prodaje električne energije, kao i odgovarajuća zakonska ograničenja. Jedan od zaključaka je da je, u konkretnom slučaju, za hlađenje povoljnije koristiti apsorpzione mašine u sprezi sa kogeneracijom od kompresorskih rashladnih mašina. Ipak, veoma je važno napomenuti da je takav zaključak baziran na razmatranju u kome nisu uzete u obzir mogućnosti skladištenja energije.

Wakui i Yokoyama [78, 79] su takođe koristili mešovito celobrojno linearno programiranje i pristup baziran na nadstrukturi postrojenja za optimizaciju sistema mikro-kogeneracije u stambenim objektima. Za razliku od prethodnih primera, cilj optimizacije je minimalna potrošnja primarne energije.

Nelinearni problemi su takođe često korišćeni, posebno kada se analizira čitav životni vek postrojenja. Klasičan pristup na bazi Lagrangeovih množilaca je korišćen u radu [138], dok su metaheurističke metode primenjene npr. u [94, 141], odnosno kombinovane sa linearnim ili mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem u [95, 97, 142].

Piacentino i dr. [138] su razmatrali primenu osnova termoeconomije na probleme optimizacije sistema koji često rade sa parcijalnim opterećenjima i, uopšte, u režimima različitim od nominalnih. Predložen je algoritam integrisane optimizacije projektnih i radnih parametara kompleksnih energetskih sistema na bazi Lagrangeovih množilaca. Ciljevi optimizacije su neto sadašnja vrednost i ušteda primarne energije. Prikazana je njegova primena na primeru sistema trigeneracije u hotelu. Nije predviđena analiza sistema sa akumulatorima toplotne energije. Kao osnovni nedostatak ove metodologije navedena je potreba za značajnim uprošćenjima u složenijim slučajevima.

Li i dr. [141] su definisali problem mešovitog celobrojnog nelinearnog programiranja u cilju optimizacije sistema trigeneracije za snabdevanje urbanog stambenog naselja. Razmatrani su gasni motori i gasne turbine, kotlovi i apsopzione rashladne mašine. Diskretne nezavisno promenljive veličine su one kojima se definiše struktura postrojenja. U obzir su uzete performanse pri parcijalnim opterećenjima čiji je značaj za određivanje radnih režima i optimalne konfiguracije naglašen. Cilj optimizacije je neto sadašnja vrednost za period od 15 godina, a posebna pažnja posvećena je analizi emisije CO<sub>2</sub> i oksida azota, što je i implementirano u funkciju cilja putem odgovarajućih taksi. Za rešavanje ovog problema su korišćeni genetski algoritmi.

Burer i dr. [94] su predstavili višekriterijumsku optimizaciju sistema za proizvodnju električne energije i daljinsko grejanje i hlađenje koji snabdeva energijom grupu stambenih zgrada. Sistem se sastoji od kogenerativnog postrojenja koje čine gorivna ćelija i gasna turbina, dodatnog kotla, kompresorskih toplotnih pumpi i kompresorskih i apsorpcionih rashladnih mašina. Skladištenje energije nije razmatrano. Ciljevi

višekriterijumske optimizacije su postizanje najvećih mogućih smanjenja emisije CO<sub>2</sub> i najmanjih troškova energenata. U obzir su uzete zavisnosti performansi komponenata od opterećenja, osim za gorivne ćelije i gasne turbine. Razmatrana su tri tipična dana: po jedan za zimski, letnji i prelazni period. Za optimizaciju je korišćen evolutivni algoritam, a rezultati su prikazani u obliku skupa Pareto krivih. Naglašen je veliki potencijal gorivnih ćelija, posebno u kombinaciji sa toplotnim pumpama i rashladnim uređajima, za smanjenje emisije CO<sub>2</sub>, čak i kada se porede sa sistemima niske specifične emisije.

Weber i dr. [97] su prikazali optimizaciju projektnih parametara i radnog režima decentralizovanog sistema trigeneracije. Reč je o hibridnom pristupu sa ciljem minimizacije troškova i emisije gasova sa efektom staklene bašte, u fazama izgradnje postrojenja i njegove eksploatacije. Razmatran je period od jedne godine, koji je aproksimiran sa 12 tipičnih dana i vremenskim korakom od 1 h. Razmatrani sistem služi za snabdevanje energijom kancelarijskog prostora. Sistem se sastoji od: gorivne ćelije, dva skladišta energije, apsorpcionih i kompresorskih rashladnih mašina i toplotne pumpe. Sistem može da preuzima električnu energiju iz mreže, ali ne može da je predaje. Nisu predviđene celobrojne promenljive. Svi stepeni korisnosti i koeficijenti performansi su smatrani konstantnim. Toplotni gubici skladišta toplotne energije su računati kao funkcija kapaciteta. Problem je podeljen na dva nivoa. Prvi nivo predstavlja linearni problem optimizacije radnog režima postrojenja, koji se rešava posebno za svaki od 12 tipičnih dana sa ciljem minimizacije emisije gasova sa efektom staklene bašte, za zadate vrednosti projektnih parametara. Drugi nivo predstavlja određivanje optimalnih kapaciteta koristeći dobijene optimalne radne režime kao poznate, sa ciljem smanjenja godišnjih troškova i godišnje emisije gasova sa efektom staklene bašte, korišćenjem evolutivnih algoritama. Rezultati su dati kao Pareto krive. Zaključeno je da smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte može da bude do 45 %, uz povećanje troškova skoro tri puta u poređenju sa konvencionalnim sistemima. Veoma važan je i zaključak da je moguće poboljšati realističnost rezultata razmatranjem strategije uključivanja i isključivanja komponenata. Ovo je jedan od retkih primera u kome je vršena optimizacija postrojenja u kome je problem strukturno dekomponovan na dva nivoa pri čemu funkcije cilja oba nivoa ne moraju biti u saglasnosti, tj. mogu biti suprotstavljene.

Fazlollahi i dr. [95] su prikazali originalnu dekompoziciju problema optimizacije kompleksnih energetske sistema sa kogeneracijom, toplotnim pumpama, kotlovima i fotonaponskim ćelijama. Problem je podeljen na dva nivoa od kojih viši obuhvata strukturne nezavisno promenljive veličine, dok niži tretira projektne i radne parametre. Nezavisno promenljive veličine višeg problema su ulazne veličine za niži. Prvi problem se rešava evolutivnim algoritmima, a drugi mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem. Posebna pažnja je posvećena uvođenju više ciljeva optimizacije

i mogućnosti razmatranja dobijenih rešenja bliskih Pareto optimalnim. Ciljevi su ukupni troškovi i emisija CO<sub>2</sub>. Za višekriterijumsku optimizaciju je korišćena originalna kombinacija metoda  $\varepsilon$ -ograničenja i celobrojnih presečnih ograničenja. Analiza se zasniva na 12 tipičnih dana.

Pored razmatranja koja se odnose na pojedinačne sisteme snabdevanja energijom, veoma slični pristupi se mogu primeniti za optimzaciju više međusobno povezanih distribuiranih postrojenja, tzv. mikro-mreža. Sistemi mogu biti povezani u mikro-mrežu preko komponenata za distribuciju električne ili toplotne energije. Ono što često karakteriše njihovu optimizaciju je određivanje optimalnih parametara komponenata za distribuciju energije (npr. cevovoda). Planiranje rada komponenata je često znatno kompleksnije nego kod klasičnih postrojenja. Značaj planiranja rada i optimizacije sistema u okviru mikro-mreža je naglašen u radovima [143, 144]. Jedan od primera optimizacije ovakvih postrojenja dat je u radu [73] i već je diskutovan.

Za rešavanje ovakvih problema u literaturi se najčešće koristi mešovito celobrojno linearno programiranje [85–87, 90, 91].

Piacentino i dr. [90] su formulisali, a Piacentino i Barbaro [91] primenili metodologiju optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara kompleksnih energetskih sistema za snabdevanje zgrada koja se bazira na nadstrukturi postrojenja. Funkcija cilja je neto sadašnja vrednost, a energetski i ekološki ciljevi su uzeti u obzir preko odgovarajućih ograničenja. Na primer, u vezi sa primarnom energijom je uvedeno ograničenje da postrojenje mora da zadovolji uslove visoko-efikasne kogeneracije prema [15]. U radu [91] su korišćena 24 tipična dana i korak od 2 h za optimizaciju sistema za snabdevanje hotela, dve bolnice i kancelarijske zgrade. Sistemi su povezani toplotnom distributivnom mrežom.

Bracco i dr. [85] su optimizovali strukturu, projektne i radne parametre više povezanih postrojenja od kojih se svako nalazi u jednoj od nekoliko razmatranih zgrada u urbanom području: školu, bazen, administrativnu zgradu i stambeni kompleks. Reč je o malim kogenerativnim postrojenjima sa gasnim motorima ili turbinama i kotlovima na prirodni gas, međusobno povezanim toplotnom distributivnom mrežom i priključenih na glavnu električnu distributivnu mrežu. Pored samih postrojenja, predmet optimizacije je i pomenuta toplotna distributivna mreža. Razmatrana su četiri tipična dana — po jedan za svako godišnje doba. Matematički model je veoma detaljan i sadrži značajan broj binarnih nezavisno promenljivih veličina — strukturnih i radnih. Ciljevi optimizacije su godišnji ukupni troškovi i emisija CO<sub>2</sub>, a funkcija cilja predstavlja njihovu linearnu kombinaciju, tj. težinsku sumu. Naglašena je opšta validnost predloženog modela, ali ne i dobijenih rezultata, s obzirom na specifičnost ulaznih parametara — tarifa energenata, klime, potreba korisnika itd.

Mehlerer i dr. [86, 87] su takođe koristili pristup zasnovan na nadstrukturi za optimizaciju strukture, projektnih i radnih parametara međusobno povezanih sistema za energetska snabdevanje zgrada, ali i toplotne distributivne mreže koja ih povezuje. Razmatrane komponente su: mikro-kogenerativne jedinice, fotonaponski paneli, akumulatori toplotne energije i kotlovi. Matematički model je relativno detaljan. U radu [86] predviđeno je da postrojenja budu povezana sa centralnom mrežom za distribuciju električne energije, dok se u [87] razmatra i lokalna električna distributivna mreža koja bi povezivala razmatrana postrojenja. Cilj optimizacije su minimalni ukupni godišnji troškovi u koje je uključena i komponenta koja se odnosi na emisiju ugljenika, izražena putem odgovarajuće takse.

Menon i dr. [145] su prikazali optimizaciju ukupnih troškova i emisije CO<sub>2</sub> energetskih sistema na više nivoa: lokalnom nivou, tj. nivou pojedinačnih zgrada koje mogu imati jedinice za kogeneraciju, toplotne pumpe, kotlove, akumulator toplotne energije i vezu sa električnom distributivnom mrežom, zatim nivou više zgrada i konačno na nivou same električne mreže. Koristili su sedam tipičnih i jedan projektni dan.

Pored individualnih postrojenja i mikro-mreža, sistemi daljinskog grejanja sa kogeneracijom su često predmet optimizacije. Münster i dr. [146] su na primeru Danske zaključili da daljinsko grejanje može, na ekonomski efektivan način, doprineti održivosti i sigurnosti snabdevanja energijom. Naglašena je važnost upotrebe toplotnih pumpi, kogeneracije i akumulatora energije u ovim sistemima i njihove moguće sprege sa tehnologijama na bazi obnovljivih izvora energije. Ortiga i dr. [147] su na španskom primeru pokazali da sistem daljinskog grejanja i hlađenja na bazi trigeneracije sa gasnim motorima, kotlovima i apsorpcionim i kompresorskim rashladnim mašinama može biti veoma povoljan sa aspekta potrošnje primarne energije i emisije CO<sub>2</sub>. Dodatni pozitivni efekti se, uz značajno povećanje investicije, mogu postići dodavanjem postrojenja za gasifikaciju biomase i solarno hlađenje.

Christidis i dr. [36] su optimizovali kapacitet više akumulatora toplotne energije koji bi trebalo da budu integrisani u postojeći sistem daljinskog grejanja sa kogeneracijom i ispitivali potencijal povećanja profitabilnosti ugradnjom akumulatora u sistem koji inače radi u okviru liberalizovanog tržišta električnom energijom. Optimizovani su i radni parametri postrojenja. Razmatrana je cela godina, a korišćene su i radne binarne nezavisno promenljive veličine, ali dodatni troškovi puštanja u rad i zaustavljanja postrojenja nisu uzeti u obzir. U osnovi mešoviti celobrojni nelinearni problem je transformisan u problem mešovitog celobrojnog linearnog programiranja. Rezultati su pokazali da implementacija akumulatora smanjuje vršno opterećenje i potrebu za radom kotlova i povećava proizvodnju energije kogeneracijom. Periodi povraćaja investicije procenjeni su na 0,4 – 3,4 godine.

Rieder i dr. [33] su poredili i analizirali međusobnu zavisnost akumulatora toplotne energije i mreže daljinskog grejanja sa ekonomskog i ekološkog aspekta. U tu svrhu je vršena optimizacija strukture, projektnih i radnih parametara celokupnog kogenerativnog postrojenja mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem i korišćen uprošćen pristup zasnovan na nadstrukturi postrojenja. Ciljevi višekriterijumske optimizacije su profit i emisija CO<sub>2</sub>, a problem je formulisan metodom težinskih suma. Troškovi održavanja su uzeti u obzir samo za kogenerativne jedinice, kao i zavisnost performansi od opterećenja komponenata. Matematički model akumulatora toplotne energije je relativno jednostavan. Pretpostavljeno je da se sva proizvedena električna energija preda distributivnoj mreži. Razmatrana je cela godina sa vremenskim korakom od 4 h. Veoma je zanimljiva analiza korelacije pojedinih parametara koji se menjaju sa vremenom. U scenarijima bez akumulatora, postoji visok nivo zavisnosti između potrebe korisnika za toplotnom energijom i električne energije proizvedene kogeneracijom (koeficijent korelacije je veći od 0,9) i nizak nivo zavisnosti između tržišne cene po kojoj se prodaje električna energija i proizvedene električne energije (koeficijent korelacije je manji od 0,4). Razlog tome je neophodnost rada kogenerativnog postrojenja u režimu praćenja toplotne potrebe korisnika. Sa druge strane, kada se razmatra akumulator, moguće je vremenski razdvojiti proizvodnju od potrošnje i proizvodnju bolje prilagoditi profitu, tj. promenljivim tržišnim cenama električne energije, pa se javlja jasnija zavisnost proizvedene električne energije i cene (koeficijent korelacije je oko 0,55) i znatno manja zavisnost proizvedene električne energije i toplotne potrebe korisnika (koeficijent korelacije je oko 0,65). Takođe je moguće iz akumulatora zadovoljiti toplotne potrebe korisnika kada su one niže od minimalnog dozvoljenog opterećenja jedinica. I akumulator i mreža za daljinsko grejanje doprinose boljem iskorišćenju kogeneracije, tj. dužem vremenu rada, a posledično i smanjenju emisije CO<sub>2</sub>. Ipak, za razliku od akumulatora, sama mreža ne može obezbediti dovoljan nivo fleksibilnosti u radu i značajno vremensko odvajanje rada kogenerativnih sistema od potrebe korisnika. Takođe je zaključeno da dimenzionisanje kogenerativnih sistema u velikoj meri zavisi od izbora akumulatora i distributivne mreže i naglašena potreba za kombinovanom optimizacijom celog sistema.

Buoro i dr. [114] su optimizovali strukturu, projektne i radne parametre distribuiranog sistema za snabdevanje električnom i toplotnom energijom industrijske oblasti. Nadstrukturu sistema je predviđeno da svaki korisnik može imati kogenerativnu jedinicu i kotao, dok centralno postrojenje sadrži kotao, veliko solarno postrojenje i akumulator za dugoročno skladištenje toplotne energije. Toplovodna mreža povezuje korisnike sa centralnim postrojenjem, kao i međusobno. Ciljevi optimizacije su ukupni godišnji troškovi investicije, energije i rada i održavanja i emisija CO<sub>2</sub> tokom perioda rada postrojenja, a za formulaciju problema višekriterijumske optimizacije je korišćena metoda težinskih suma. Problem je rešavan korišćenjem mešovitog celobrojnog linearnog

programiranja. Pošto je reč o korisnicima sa značajnim promenama u potrebama za energijom tokom nedelje — potrošnja tokom vikenda je znatno manja — kao i o slučaju sa velikim akumulatorom energije, umesto tipičnih dana je razmatrano 12 tipičnih nedelja. Pokazana je značajna zavisnost uticaja implementacije kogeneracije na bazi prirodnog gasa na emisiju CO<sub>2</sub> od faktora emisije elektrodistributivne mreže, kao i zavisnost načina rada kogenerativnog postrojenja od istog faktora kada je emisija CO<sub>2</sub> uključena u funkciju cilja. U radu [148] je korišćena slična metodologija i sličan primer, s tim što je razmatrano i hlađenje, tj. lokalne apsorpcione i kompresorske rashladne mašine kao deo nadstrukture, data je mogućnost ugradnje centralne kogenerativne jedinice i uzeta je u obzir samo jedna funkcija cilja — ukupni godišnji troškovi. Rezultati su pokazali da se u razmatranom slučaju optimalan rad akumulatora zasniva na nedeljnim a ne sezonskim ciklusima punjenja i pražnjenja, kao i da implementacija ovakvog sistema, uglavnom baziranog na proizvodnji toplotne energije iz energije Sunca, može značajno smanjiti troškove i potrošnju primarne energije.

Molyneaux i dr. [149] su koristili evolutivni algoritam za višekriterijumsku optimizaciju sistema daljinskog grejanja polazeći od nadstrukture koja obuhvata centralno postrojenje sa toplotnom pumpom, gasnim motorom, gasnom turbinom i kotlom, koje je toplotnom distributivnom mrežom povezano sa korisnicima koji mogu imati lokalnu toplotnu pumpu i dodatni električni grejač za pripremu sanitarne tople vode. Centralno postrojenje može da preuzima električnu energiju iz distributivne mreže, ali ne može da je predaje mreži, već samo korisnicima. Razmatran je životni ciklus postrojenja, a ciljevi su ukupni troškovi i emisija CO<sub>2</sub>. Naglašena je značajna osetljivost rezultata na promene velikog broja parametara. Rezultati su pokazali značajan potencijal ovakvih sistema za smanjenje emisije CO<sub>2</sub>, pri čemu je sa aspekta emisije najbolje da centralna toplotna pumpa pokriva celokupno toplotno opterećenje, dok ekonomski optimalno postrojenje treba da ima još i gasnu turbinu i kotao.

#### *2.7.3.4. Stohastički problemi optimizacije*

Problemi optimizacije sistema sa kogeneracijom u kojima se uzima u obzir neizvesnost u vezi sa nekim ulaznim parametrima često se rešavaju korišćenjem koncepta verovatnoće, tj. stohastičkim programiranjem.

Hu i Cho [150] su prikazali višekriterijumsku optimizaciju radnog režima postrojenja za trigeneraciju sa neizvesnim vrednostima potreba korisnika, dok je u radovima [57, 151] vršena optimizacija projektnih parametara takođe u uslovima neizvesnih zahteva potrošača u zgradama.

U radu [152] je razmatrana optimizacija radnog režima postrojenja sa kogeneracijom

i vetrogeneratorima uz pretpostavku da je raspoloživa energija vetra neizvestan ulazni parametar. U radu [153] su se osim energije vetra, neizvesnim smatrali i energija Sunca za fotonaponske ćelije, ali i potrebe korisnika.

Wu i dr. [154] su kombinovali optimizaciju rojevima čestica i Monte-Carlo analizu prilikom optimizacije radnih parametara komponenata povezanih u mikro-mrežu — fotonaponskih ćelija, vetrogeneratora, baterija i više tipova kogenerativnih jedinica. Neizvesnost je razmatrana u vezi sa opterećenjem postrojenja, raspoloživim količinama obnovljive energije i pouzdanošću rada komponenata.

#### *2.7.3.5. Pristup zasnovan na fazi matematičkom programiranju*

Pristupi zasnovani na fazi skupovima i fazi matematičkom programiranju su se pokazali pogodnim za optimizaciju ili evaluaciju energetske sistema. Ipak, stiče se utisak da, iako primenljive i korisne, ove metode nisu dovoljno popularne i eksploatisane u ovoj oblasti, kao i da postoji dosta prostora za njihovu dalju primenu.

Kada je reč o višekriterijumskoj optimizaciji energetske sistema, već je rečeno da ciljevi, tj. kriterijumi optimizacije najčešće pripadaju jednoj od tri grupe: (1) finansijsko-ekonomski, (2) energetski i (3) ekološki kriterijumi. Ovi ciljevi su često međusobno suprotstavljeni, pa je obično teško ili nemoguće naći rešenje koje istovremeno u potpunosti zadovoljava sve njih. Različiti kriterijumi su različite prirode, različitih fizičkih veličina, a veoma često su i njihove brojne vrednosti različitih redova veličine. Zbog toga je poželjno definisati proceduru normalizacije kriterijuma optimizacije i njihovog prevođenja u uporedive bezdimenzione veličine. Pored toga, kod klasičnih determinističkih modela optimizacije, zadata ograničenja, tj. jednačine ili nejednačine veze moraju biti potpuno zadovoljene. U praksi to nije uvek tako. Na primer, nekada može biti prihvatljivo donekle umanjiti nivo termičkog komfora objekta, odnosno isporučiti manje energije od definisanog iznosa radi postizanja novčanih ušteda kroz smanjenje potrošnje energenata ili ugradnju komponenata manjih kapaciteta. Matematički modeli energetske sistema koji u tom smislu više odgovaraju realnoj situaciji se mogu definisati upravo fazifikacijom, a kasnije i defazifikacijom kriterijuma optimizacije i pojedinih (retko svih) ograničenja, pod pretpostavkom da se pomenuti kriterijumi i ograničenja mogu iskazati u formi fazi skupova. Ograničenja u problemu optimizacije koja moraju uvek biti zadovoljena u potpunosti se nazivaju tvrdim ograničenjima. Sa druge strane, tzv. meka ograničenja ne moraju biti uvek potpuno zadovoljena. Međusobno suprotstavljene kriterijume optimizacije u okviru jednog višekriterijumskog problema moguće je definisati u formi mekih ograničenja, a cilj može biti postizanje najvećeg ukupnog stepena zadovoljenja svih kriterijuma.

Fazi logika i fazi skupovi [22] su često korišćeni u tehnici i nauci, a značajnu primenu imaju i u fazi matematičkom programiranju. Fazi matematičko programiranje se koristi kada postoji neizvesnost, nepreciznost, nejasnoće ili neodređenost u vezi sa formulacijom problema optimizacije, tj. njegovih koeficijenata, ciljeva ili ograničenja. Ono omogućava uzimanje u obzir tolerancija vrednosti parametara, tj. koeficijenata kojima se množe nezavisno promenljive veličine problema optimizacije na prirodan i direktan način tako što se funkcijama pripadnosti predstavljaju: nivoi zadovoljenja mekih ograničenja, očekivanja donosioca odluka u vezi sa vrednostima funkcija cilja i dozvoljene tolerancije ovih koeficijenata [155].

Opšti pristup planiranju procesa u fazi okruženju i korišćenju fazi programiranja u slučaju mešovitog celobrojnog linearnog problema, primenljiv i na planiranje rada energetskih sistema, prikazan je u radu [155]. Naglašena je razlika između dva tipa fazi programiranja: (1) fleksibilnog programiranja i (2) posibilističkog programiranja. Kod fleksibilnog programiranja je reč o postojanju neodređenosti, nesigurnosti ili neizvesnosti u vezi sa slobodnim članovima (ne)jednačina veze. Kod posibilističkog programiranja se u osnovi radi o neizvesnim vrednostima koeficijenata kojima se množe nezavisno promenljive veličine u (ne)jednačinama veze i funkcijama cilja [155, 156]. Fleksibilno programiranje se koristi za modeliranje mekih ograničenja i za probleme višekriterijumske optimizacije. Ograničenja su prikazana kao fazi skupovi, a kriterijumi optimizacije se prikazuju kao meka ograničenja, dok cilj optimizacije postaje približavanje svih kriterijuma idealnim vrednostima u što većoj meri. Sa druge strane, posibilističko programiranje se koristi za modeliranje neizvesnosti, nepreciznosti ili nedostatka znanja u vezi sa vrednostima parametara modela, tj. koeficijenata [157].

Iako se oba pristupa bave optimizacijom u uslovima neizvesnosti, fazi matematičko programiranje se razlikuje od stohastičkog programiranja jer je prvo zasnovano na konceptu fazi logike, a drugo na teoriji verovatnoće [158]. Kod prvog se parametri posmatraju kao fazi brojevi, a zadovoljenje ograničenja se poredi sa pripadnošću fazi skupovima, dok se kod drugog neizvesnost uzima u obzir korišćenjem diskretnih ili kontinualnih funkcija verovatnoće [156]. Kod posibilističkog programiranja se koriste koncepti mogućnosti i neophodnosti, dok se kod stohastičkog programiranja radi o optimizaciji očekivanja, minimizaciji varijacije ili maksimizaciji verovatnoće [159].

Korišćenje fazi matematičkog programiranja za formulisanje i rešavanje višekriterijumskih linearnih problema optimizacije ilustrovano je u radovima [160, 161]. Problem optimizacije je potrebno redefinisati tako da se od svake funkcije cilja dobije novo meko ograničenje, a nova funkcija cilja postaje zadovoljenje svih mekih ograničenja u najvećoj mogućoj meri [162]. To se radi tako što se svakoj funkciji cilja dodeli odgovarajuća funkcija pripadnosti. U osnovi, funkcija pripadnosti je mera

odstupanja dobijenog od idealnog rešenja za posmatranu funkciju cilja. Ukoliko je vrednost funkcije cilja jednaka njenoj optimalnoj, tj. idealnoj vrednosti (vrednosti koju bi imala kada ne bi bilo drugih funkcija cilja), odgovarajuća funkcija pripadnosti ima vrednost 1. Ukoliko je vrednost funkcije cilja jednaka predefinisanoj anti-idealnoj vrednosti, tj. vrednosti na granici prihvatljivosti, funkcija pripadnosti ima vrednost 0. Iako je moguće koristiti različite tipove funkcija cilja, linearne funkcije su najčešće korišćene u literaturi jer omogućavaju kreiranje relativno jednostavnih modela, često linearnih, a uz to imaju i veoma dobra svojstva kada je u pitanju kvalitet dobijenih rešenja [155]. Problem optimizacije postaje problem što kompletnijeg zadovoljenja svih ograničenja, tj. maksimizacija vrednosti svih funkcija pripadnosti. Postoji više načina da se definiše nova funkcija cilja od kojih se izdvajaju dva osnovna:

- (1) korišćenje nekompensacionog tzv. max-min/logičkog-i operatora, kada se cilj optimizacije definiše kao maksimizacija najmanje vrednosti funkcije pripadnosti i
- (2) korišćenje tzv. osrednjavajućeg/kompensacionog-i operatora, kada se cilj definiše kao maksimizacija srednje vrednosti (ili sume) svih vrednosti funkcija pripadnosti.

Korišćenjem prvog pristupa se najveća pažnja poklanja ciljevima tj. ograničenjima koje je teže zadovoljiti, dok drugi garantovano rezultira efikasnim rešenjima, ali često sa nedovoljno pažnje posvećene ciljevima koji su zadovoljeni u manjoj meri [162]. Kao kompromisno rešenje, Bilgen [157] je predložio korišćenje linearne kombinacije dve nove funkcije cilja ili linearne kombinacije stepena zadovoljenja najmanje i najviše zadovoljenog ograničenja.

Korišćenje fleksibilnog programiranja za delimičnu relaksaciju pojedinih ograničenja je prikazano u radu [157]. Pristup je veoma sličan kao kod višekriterijumske optimizacije. Kao što se od svih funkcija cilja kreiraju nova meka ograničenja i za svaku definiše funkcija pripadnosti, tako se i ograničenja koja se žele relaksirati takođe predstavljaju kao meka ograničenja i njima se dodeljuju odgovarajuće funkcije pripadnosti kojima se iskazuje nivo zadovoljenja: funkcija pripadnosti ima vrednost 1 ukoliko je ograničenje potpuno zadovoljeno, 0 ako je na granici zadovoljenja, a između 0 i 1 ukoliko je zadovoljeno delimično.

Uopšteni pristup fazi optimizaciji termodinamičkih sistema, tj. sistema transformacije energije definisao je Mazur [163]. Problem je posmatran kao nelinearni, a ciljevi su podeljeni na termodinamičke, ekonomske i ekološke. Prilikom fazifikacije je korišćen model Bellmana i Zadeha. Upotrebljen je max-min operator, tj. krajnji cilj optimizacije je definisan kao određivanje nezavisno-promenljivih veličina tako da se dobije maksimalna vrednost minimuma vrednosti svih funkcija pripadnosti. Predloženo je da se rešenja prikažu u formi Pareto skupa, tj. intervala nezavisno-promenljivih veličina u kome je

zadovoljen uslov da se vrednost jednog kriterijuma ne može poboljšati bez pogoršanja vrednosti ostalih kriterijuma. Prikazani prisup je ilustrovan pomoću dva primera. Prvi se odnosi na optimizaciju kogenerativnog postrojenja, tj. klasični CGAM problem [164] sa ciljem minimizacije sledećih kriterijuma: termodinamičkog — odstupanja eksergetske efikasnosti postrojenja od zadate idealne vrednosti i ekonomskog — ukupnog troška rada postrojenja po jedinici vremena. Drugi primer ilustruje primenu na problemu izbora radnog fluida parnog kompresorskog rashladnog postrojenja. Rangiranje rashladnih fluida je izvršeno prema fazi termoekonomskom kriterijumu, koji je formiran za svaki fluid kao presek funkcija pripadnosti koeficijenta performansi (za zadati tip ciklusa, temperature isparavanja i kondenzacije itd) i troškova tokom životnog ciklusa, kao i prema ekološkim kriterijumima: potencijala uništavanja ozonskog omotača, potencijala globalnog zagrevanja i indeksa zapaljivosti.

Cziesla i Tsatsaronis [165] su primenili fazi sisteme pri iterativnom eksergoekonomskom vrednovanju termoenergetskih postrojenja, sa ciljem poboljšanja njihove ekonomičnosti, tačnije za nalaženje minimuma cene proizvoda složenog termičkog sistema. Cilj uvođenja fazi sistema bio je korišćenje znanja, iskustva, intuicije i kreativnosti eksperata, iskazanih matematički i softverski kroz funkcije pripadnosti i fazi logiku. Pristup je prikazan na primeru jednostavnog kogenerativnog postrojenja sa gasnom turbinom.

Još jedan primer višekriterijumske optimizacije energetskih sistema sa kogeneracijom zasnovane na fazi pristupu i primenjene na, ovoga puta donekle korigovanom CGAM problemu prikazali su Sayyaadi i dr. [166]. U odnosu na originalni CGAM problem, dodata je analiza uticaja na životnu sredinu, koja obuhvata emisije CO<sub>2</sub>, CO i oksida azota, upotrebljena je sofisticiranija ekonomska analiza i dodata je još jedna nejednačina veze u termodinamičkom delu matematičkog modela. U osnovi je reč o optimizaciji radnih parametara energetskog postrojenja, pri čemu je matematički model definisan kao nelinearan sa kontinualnim nezavisno promenljivim veličinama. Definisana su tri cilja optimizacije: (1) eksergetski — najveća vrednost ukupne eksergetske efikasnosti postrojenja, (2) eksergoekonomski — najmanja vrednost troška jedinice proizvoda sistema i (3) ekološki — najmanji trošak negativnog uticaja na životnu sredinu u jedinici vremena. Takođe je korišćen model Bellmana i Zadeha i max-min operator. Za rešavanje ovog kontinualnog nelinearnog problema izabrana je metoda optimizacije rojevima čestica. Rešenja su prikazana u formi trodimenzionalnih Pareto skupova, tj. površi i poređena sa rešenjima dobijenim korišćenjem klasičnih modela.

Fazi programiranje je korišćeno i za rešavanje problema optimizacije fleksibilnih sistema kogeneracije i trigeneracije, a u cilju definisanja adekvatnijih matematičkih modela u slučajevima postojanja više kriterijuma optimizacije ili nepreciznosti u proceni nekih ulaznih parametara kao što su potražnja energije ili cene energenata. Kao što je već

rečeno, Sakawa i Matsui [93] su primenili metodu optimizacije rojevima čestica za višekriterijumsku optimizaciju radnog režima postrojenja za daljinsko grejanje i hlađenje sa ciljevima minimizacije troškova rada i potrošnje energije sistema. Usvojene su linearne funkcije pripadnosti vezane za kriterijume optimizacije. Definisani su tzv. uvećani minimax problem i prikazan algoritam za njegovo rešavanje. Ono što je karakteristično za ovako definisan problem je postojanje tzv. referentnih nivoa pripadnosti pomoću kojih se lakše podešavaju vrednosti funkcija pripadnosti i, posledično, nivoi zadovoljenja fazi ograničenja, tj. postavljenih ciljeva višekriterijumske optimizacije.

Mavrotas i dr. [84] su, koristeći fazi pristup, optimizovali sistem za snabdevanje energijom jedne bolnice uzimajući u obzir neizvesnost, odnosno nepreciznost pretpostavke budućih profila opterećenja, tj. potražnje električne energije, kao i energije za grejanje i hlađenje. Ispitivane su mogućnosti ugradnje sistema kogeneracije na bazi motora sa unutrašnjim sagorevanjem i apsorpcionih i/ili kompresorskih rashladnih mašina uz dodatne postojeće sisteme (kotlove, split sisteme za klimatizaciju i sistem snabdevanja električnom energijom iz nacionalne mreže). Definisani su mešoviti celobrojni linearni problem optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara sistema trigeneracije u kome su kontinualne nezavisno promenljive veličine predstavljale tokove energije i kapacitete opreme, a binarne se odnosile na prihvatanje ili odbijanje ugradnje određenih komponenata i puštanje u rad i zaustavljanje prihvaćenih komponenata. Profili opterećenja su definisani za 12 tipičnih dana u godini (po jedan za svaki mesec). Posmatrani vremenski korak je 1 h. Fazi ograničenja su se odnosila upravo na zadovoljenje neizvesnih nivoa potražnje energije. Svako od tri razmatrana opterećenja (električna energija, grejanje i hlađenje), u svakom posmatranom vremenskom intervalu, prikazano je kao fazi broj sa najnižom prihvatljivom vrednošću i najvišom, tj. najsigurnijom vrednošću, kao i linearnom funkcijom pripadnosti. Reč je o višekriterijumskoj optimizaciji, gde se, pored dobijanja najnižih godišnjih nivelisanih troškova za period od 15 godina, koji podrazumevaju i investicione troškove i troškove energije, teži i najvišem nivou zadovoljenja potreba korisnika za energijom. Jasno je da su ova dva cilja međusobno suprotstavljena jer da bi se povećala mogućnost zadovoljenja energetske potreba iz planiranog sistema trigeneracije, potrebno je ugraditi opremu većeg kapaciteta, čime se povećava investicija i ciljni godišnji nivelisani trošak. Pareto optimalna rešenja su dobijena primenom metode  $\epsilon$ -ograničenja u prvom koraku. U drugom koraku su se određivali optimalni radni režimi za već utvrđene strukturne i projektne parametre i neizvesnu potražnju energije. Dobijeni rezultati su pokazali gotovo linearnu zavisnost godišnjeg nivelisanog troška od stepena zadovoljenja potreba za energijom, kao i ekonomsku opravdanost ugradnje sistema za kogeneraciju sa apsorpcionim i kompresorskim rashladnim uređajima u skoro svim scenarijima i mogućnost smanjenja nivelisanih godišnjih troškova za oko 5 % u odnosu na scenario bez implementacije trigeneracije.

Moradi i dr. [142] su takođe prikazali pristup optimizaciji sistema snabdevanja energijom u kome je korišćeno fazi programiranje kako bi se u obzir uzela nepreciznost u vezi sa predviđanjem električnog i toplotnog opterećenja, ali i cena prirodnog gasa i električne energije. Ovde je reč o optimizaciji projektnih parametara i radnog režima postrojenja za kogeneraciju takođe primenjenoj na slučaju jedne bolnice. Cilj optimizacije je dobijanje maksimuma neto sadašnje vrednosti za period od 20 godina. U obzir je uzeto i smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte svođenjem na monetarnu vrednost i uključivanjem u troškove rada i održavanja sistema. Stepeni korisnosti kotlova i kogenerativnih jedinica su smatrani konstantnim, tj. nezavisnim od režima rada. Predviđena je i mogućnost prodaje viška električne energije. Kada je reč o profilima električnog i toplotnog opterećenja, u obzir su uzeta 24 tipična dana u godini, po jedan radni dan i dan vikenda za svaki mesec, sa vremenskim korakom od 1 h. Pretpostavljen je linearan rast potražnje energije iz godine u godinu. Problem je definisan samo sa kontinualnim nezavisno promenljivim veličinama: kapacitetima kogenerativnih jedinica i kotlova i tokovima energije. Nepreciznost, tj. neizvesnost u vezi parametara prikazana je trougaonim linearnim funkcijama pripadnosti, čime je nametnuta potreba za grananjem prilikom određivanja neto sadašnje vrednosti. Ovako postavljen problem je rešen hibridnim algoritmom u kome su kombinovane metoda optimizacije rojevima čestica i linearno programiranje. Optimizacija rojevima čestica se koristi za pretraživanje vrednosti kapaciteta ugrađene opreme, a prilikom svakog izračunavanja funkcije cilja — neto sadašnje vrednosti — određuje se finansijski optimalni radni režim (uključujući uticaj emisije gasova sa efektom staklene bašte) linearnim programiranjem. Dakle, pretpostavka prilikom optimizacije projektnih parametara je da će postrojenje raditi u optimalnom radnom režimu. Rezultati su dobijeni u obliku optimalnih opsega neto sadašnje vrednosti.

Sheen [167] je razvio fazi modele profitabilnosti za potrebe finansijske evaluacije u kojima se uzima u obzir neizvesnost vezana za vrednosti ulaznih parametara. Evaluacija je rađena na osnovu neto sadašnje vrednosti, perioda povraćaja investicije i odnosa dobiti i troškova. Prikazana je i primena ovih modela na primeru odlučivanja da li će se ugraditi konvencionalni sistem klimatizacije ili sistem sa hladnim rezervoarom energije, kao i na primeru poređenja dva sistema kogeneracije za primenu u industriji gume. Pokazano je da su ovi modeli konzistentni sa konvencionalnim, kao i da su pogodni kao alat za donošenje odluka kada se u obzir uzima neizvesnost vrednosti parametara.

Iako se retko sreće u literaturi, korišćenje fazi logike i fazi programiranja kao instrumenta energetske politike i energetske planiranja se pokazalo veoma interesantnim. Martinsen i Krey [168] su uveli fazi ograničenja u linearni model kako bi bolje prikazali procese donošenja odluka, odnosno došli do kompromisa između različitih ciljeva integrisane energetske i klimatske politike. Ciljevi se odnose na ekonomske dobiti, očuvanje životne

sredine i sigurnost snabdevanja energijom. Napomenuto je da su neki od ciljeva kontradiktorni, dok se neki podudaraju. Razmatrani su sledeći ciljevi: udeo uvezene energije, udeo električne i toplotne energije dobijene iz obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji električne, odnosno toplotne energije, udeo biogoriva u ukupnoj količini goriva utrošenoj za transport, udeo električne energije proizvedene kogeneracijom u ukupnoj proizvedenoj količini električne energije, nivo energetske efikasnosti i emisije gasova sa efektom staklene bašte, potrošnja domaćeg uglja, životni vek nuklearnih postrojenja, kao i ukupni troškovi sistema. Osnovni cilj je definisan kao određivanje maksimuma ukupnog zadovoljenja pomenutih pojedinačnih ciljeva, od kojih je za svaki definisana ciljna (poželjna) i prihvatljiva vrednost. Prilikom fazifikacije je korišćen max-min operator, kao i linearne funkcije pripadnosti. Piltan i dr. [169] su predložili hibridni model donošenja odluka u vezi sa određivanjem prioriternih grana industrije u kojima bi se ugrađivala postrojenja za kogeneraciju zasnovan na fazi ekspertskom sistemu.

Fazi logika se može koristiti i za evaluaciju, odnosno rangiranje energetske sistema, tehnologija itd. kada se želi uzeti u obzir više kriterijuma. Wei i dr. [170] su prikazali metod vrednovanja različitih tehnologija za daljinsko grejanje kojim se, pomoću fazi logike, uvodi jedan bezdimenzioni kriterijum na osnovu njihovih ekonomskih, ekoloških i energetske karakteristika. Barin i dr. [171] su koristili fazi logiku za višekriterijumsku analizu i vrednovanje energetske tehnologija zasnovanih na obnovljivim izvorima energije — vetrogeneratora, mikroturbina, fotonaponskih ćelija i gorivnih ćelija. Vrednovanje je vršeno sa apekata uticaja na životnu sredinu, efikasnosti, troškova, trajanja životnog ciklusa, tehničke zrelosti i opsega kapaciteta.

Iz napred navedenog, može se zaključiti da primena fazi skupova, fazi logike i fazi programiranja prilikom optimizacije sistema snabdevanja energijom može rezultirati adekvatnijim i realističnijim matematičkim modelima, koji vernije i preciznije opisuje ove sisteme, postavljene ciljeve i zadata ograničenja u odnosu na klasične modele. Fazi programiranje omogućava, kao što je već navedeno, matematičko opisivanje i softversku implementaciju znanja, iskustva, intuicije i kreativnosti eksperata, iskazanih kroz funkcije pripadnosti i fazi logiku. Osim toga, ono nudi veću fleksibilnost pri kreiranju matematičkih modela i mogućnost definisanja problema i analize rezultata na kvalitativno višem nivou. Veoma je pogodno koristiti ovakav pristup:

- za višekriterijumsku optimizaciju, pri čemu se funkcije cilja transformišu u meka ograničenja, a cilj optimizacije postaje zadovoljenje ovih ograničenja u najvećoj mogućoj meri,
- kada nije neophodno striktno zadovoljiti sva postavljena ograničenja,
- kada postoji neizvesnost ili nepreciznost pri određivanju ulaznih veličina.

#### **2.7.4. Trendovi i moguća poboljšanja**

Kao što je već rečeno, fleksibilni sistemi sa kogeneracijom, pre svega sa gasnim motorima ili turbinama, su veoma bitan sastavni deo modernog koncepta snabdevanja energijom koji se odlikuje visokom zastupljenošću obnovljivih izvora i tržišnim uslovima poslovanja u oblasti proizvodnje i distribucije električne energije. Njihova fleksibilnost, kao i odnos cena i efikasnosti je veoma pogodna i za snabdevanje potrošača čija potražnja za energijom značajno varira na dnevnom, nedeljnom i godišnjem nivou — pre svega zgrada. Trigeneracija, tj. korišćenje električne i/ili toplotne energije dobijene kogeneracijom za hlađenje može biti od dodatne koristi — u energetskom, ekološkom, pa i finansijskom pogledu. Akumulatori toplotne energije — topli i hladni — mogu dodatno poboljšati fleksibilnost i pouzdanost sistema, smanjiti potreban kapacitet komponenata za pokrivanje vršnih opterećenja i povećati vreme rada baznih kogenerativnih sistema. Pored toga, oni omogućavaju kontinualan rad komponenata sistema sa nominalnim opterećenjem i vremensko odvajanje proizvodnje i potrošnje energije, čime se pri planiranju rada sistema veća pažnja može posvetiti ostvarivanju profita. Hladni akumulatori energije omogućavaju rad rashladnih uređaja noću kada su temperature okolnog vazduha niže, pa se postiže znatno veći koeficijent hlađenja.

Ovakvi fleksibilni sistemi se odlikuju velikim brojem komponenata koje mogu raditi u različitim režimima i sa različitim performansama zavisno od nivoa opterećenja i stanja okolnog vazduha. Projektovanje takvih sistema i planiranje njihovog rada je zbog toga veoma kompleksno ukoliko se žele ostvariti najbolji mogući ekonomski, energetski i/ili ekološki efekti. Zbog toga je poželjna njihova optimizacija kako u fazama ispitivanja izvodljivosti implementacije, tako i prilikom planiranja rada postojećih sistema.

Optimizacija energetskih sistema je široko primenljiva i sve češće zastupljena u literaturi, bazira se na relativno kompleksnim matematičkim tehnikama i zahtevna je u pogledu potrebnih računarskih resursa i vremena rešavanja problema. Zapravo, ograničeni računarski resursi i potrebno vreme rešavanja problema predstavljaju najveću barijeru široj upotrebi tehnika optimizacije. Svoju rastuću popularnost u naučnim i stručnim radovima optimizacija duguje konstantno izraženoj težnji za profitom investitora, sve većoj potrebi zadovoljenja energetskih zahteva potrošača po prihvatljivim cenama i uz prihvatljiv uticaj na životnu sredinu, ali i velikom napretku računarskih tehnologija i programa za optimizaciju. Konstantan napredak računarskih procesora, povećanje broja njihovih jezgara, povećanje dostupne radne memorije računara, kao i prateća drastična poboljšanja vodećih programa za optimizaciju omogućavaju efikasnije rešavanje velikih problema optimizacije. Posebno su značajna poboljšanja u oblasti mešovitog celobrojnog linearnog programiranja, pre svega metode grananja i ograničavanja i na njoj zasnovanih hibridnih metoda, npr. metode grananja i sečenja. Takođe se poboljšavaju i izdvajaju

najbolje alternative među kojima dominiraju određene metaheurističke metode. Otvaraju se i mogućnosti upotrebe veštačkih neuronskih mreža.

Kada je u pitanju optimizacija radnog režima, pre svega je primetan rast nivoa zastupljenosti tehnika optimizacije u literaturi prilikom analiza i rešavanja različitih problema. Trendovi pokazuju sve češće korišćenje mešovitog celobrojnog linearnog programiranja, kao i povećanje nivoa razmatranih detalja, pre svega vezanih za korišćenje celobrojnih nezavisno promenljivih veličina. Vremenom postaju prisutni sve kvalitetniji matematički modeli, uvode se logički izrazi, linearna aproksimacija nelinearnih funkcija celobrojnih i/ili kontinulanih nezavisno promenljivih veličina, bolje modeliranje i češće razmatranje akumulatora energije itd. Takođe je primetno poboljšanje tehnika rešavanja problema, pre svega mešovitog celobrojnog linearnog programiranja, primenom heurističkih metoda predselekcije na bazi specifičnosti razmatranih problema. U poslednje vreme se javljaju i radovi u kojima se vrši optimizacija radnog režima za celu godinu nasuprot uobičajenoj praksi aproksimacije korišćenjem nekoliko tipičnih dana.

Mogućnosti za dalji napredak su brojne. Samo praćenjem napretka programa za optimizaciju mogu se implementirati sve detaljniji matematički modeli — precizniji, logičniji i sa više detalja. Korišćenje specifičnosti matematičkih modela i problema optimizacije energetske sistema za razvoj heuristike kojom se povećava efikasnost metoda mešovitog celobrojnog linearnog programiranja je tek u začetku. Veoma važan aspekt primene optimizacije radnog režima je prilikom optimizacije strukture i projektnih parametara, pa je potrebno voditi računa o mogućnostima implementacije poboljšanja i u pristupe za sveobuhvatnu optimizaciju.

Nekoliko trendova je jasno izraženo prilikom sveobuhvatne optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara sistema za snabdevanje energijom. Pre svega, sve je češće prisutno integrisano razmatranje više distribuiranih manjih sistema međusobno povezanih električnom i/ili toplotnom distributivnom mrežom koji čine ili mikro-mrežu ili sistem daljinskog grejanja i eventualno hlađenja sa više toplotnih izvora i, ukoliko ima hlađenja, ponora. Pri tome je optimizacija samih distributivnih mreža uglavnom deo problema koji se rešava. Uz to, sve se češće vrši višekriterijumska optimizacija usled rastućeg interesovanja za smanjenjem negativnog uticaja energetske sistema na okolinu i često prisutnih podsticajnih mera. Iz istog razloga je primetan rast zainteresovanosti za integracijom tehnologija na bazi obnovljivih izvora energije, pre svega solarnih postrojenja, sa sistemima kogeneracije i trigeneracije. Preciznost procena uticaja na okolinu se povećava razmatranjem celokupnog životnog ciklusa postrojenja.

Postoji veliki broj pravaca u kojima bi se mogli razvijati budući pristupi postavljanju i rešavanju sveobuhvatnih problema optimizacije. Mogućnosti kombinovanja klasičnih

metoda linearnog programiranja i mešovitog celobrojnog linearnog programiranja sa metaheurističkim metodama su brojne. Stohastičko programiranje i uzimanje u obzir neizvesnosti u vezi vrednosti ulaznih parametara je samo jedna od relativno neistraženih oblasti optimizacije energetske sistema. Razmatranje cele godine umesto aproksimacije tipičnim danima može biti posebno korisno kada se razmatraju komponente kao što su sezonski akumulatori energije ili kada je optimizacija sistema spregnuta sa energetskim simulacijama zgrada. Veoma je interesantno da veliki broj autora pri optimizaciji sistema trigeneracije ne razmatra implementaciju hladnih akumulatora energije koji značajno mogu uticati na optimalne radne režime, kao i izbor rashladnih mašina, pa i samih sistema kogeneracije. Ukoliko se želi razvoj kvalitetnih projektnih alata koji koriste naučna znanja i metode bazirane na tehnikama optimizacije, neophodno je mnogo više pažnje prilikom matematičkog modeliranja posvetiti mogućnostima zadovoljenja projektnih ograničenja, npr. u pogledu zadovoljenja ekstremnih potreba korisnika. Do sada je vrlo malo pažnje bilo posvećeno optimizaciji energetske postrojenja na više nivoa, gde bi se npr. postrojenje projektovalo sa funkcijom cilja koja uključuje finansije i uticaj na okolinu, dok bi se pretpostavilo da će uvek raditi u finansijski optimalnom režimu. Ovakvi problemi su komplikovani za rešavanje klasičnim metodama matematičkog programiranja, ali bi se u tu svrhu mogle koristiti metaheurističke metode i strukturna dekompozicija problema koji su se pokazali veoma pogodnim i primenljivim kada su u pitanju energetske sistemi. Pored toga, moguća su i dalja poboljšanja formulacija problema višekriterijumske optimizacije, pre svega ako se razmatraju tzv. meka ograničenja.



# 3. Pristup problemu

## 3.1. Opis postrojenja za snabdevanje energijom

### 3.1.1. Struktura postrojenja

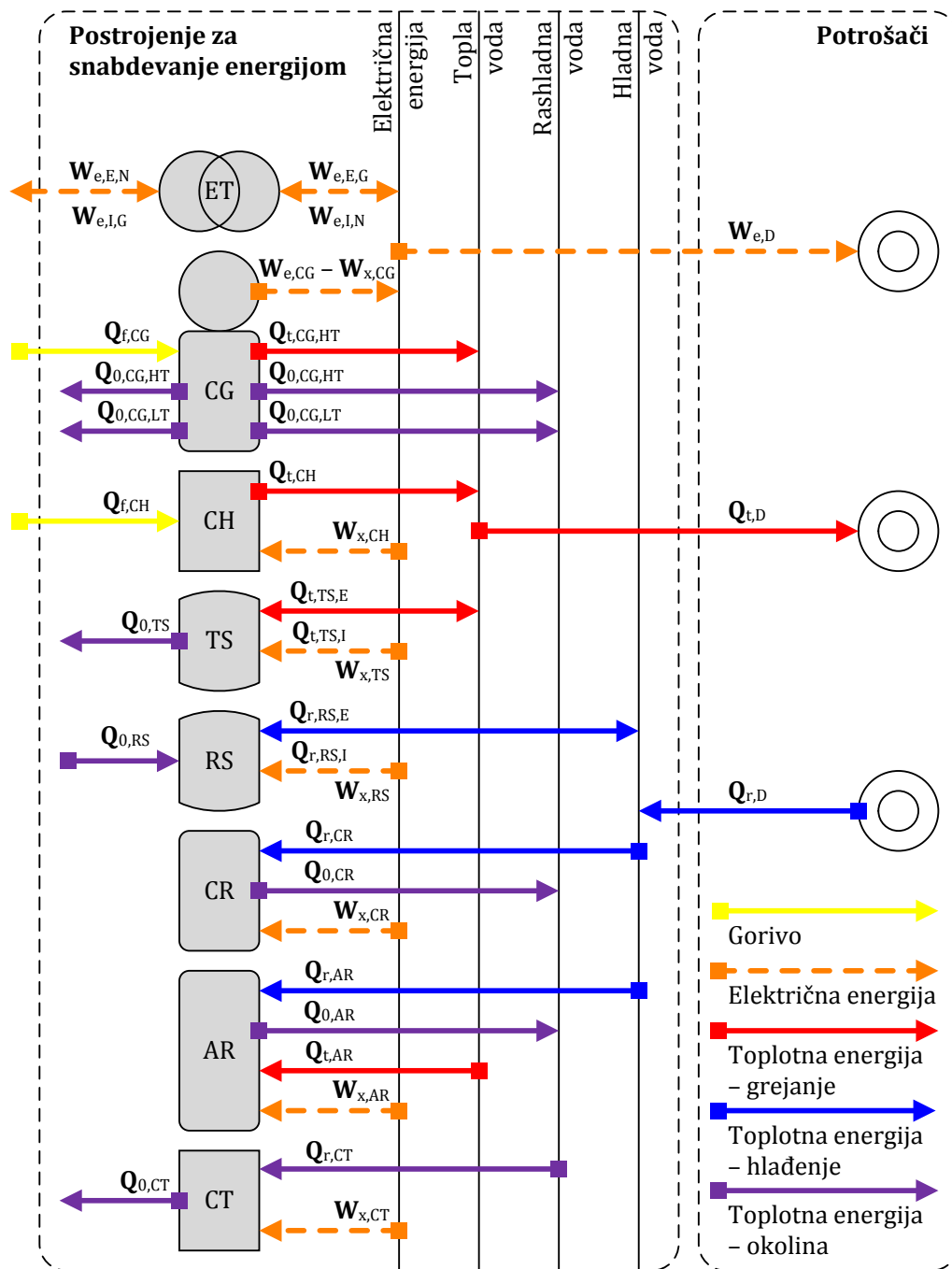
Razmatrano postrojenje sa trigeneracijom, koje služi za snabdevanje potrošača električnom energijom, kao i za zadovoljenje potreba za grejanjem i hlađenjem, sastoji se od sledećih tipova komponenata, prikazanim na slici 3.1:

- jedinica za kogeneraciju (CG), koje kao primarne pokretače mogu imati gasne klipne motore ili gasne turbine,
- transformatora električne energije (ET), koji predstavljaju vezu razmatranog postrojenja sa mrežom za distribuciju električne energije,
- kotlova za dodatno snabdevanje toplotnom energijom (CH),
- apsorpcionih rashladnih mašina (AR),
- kompresorskih rashladnih mašina (CR),
- rashladnih tornjeva (CT),
- toplih akumulatora energije (TS),
- hladnih akumulatora energije (RS).

Postrojenje može, ali ne mora sadržati jednu ili više komponenata određenog tipa.

U ovoj disertaciji će se razmatrati postrojenja za snabdevanje energijom sa relativno malim (npr. dnevnim) akumulatorima energije i fleksibilnim komponentama za konverziju energije. Ovakva postrojenja moraju biti sposobna za česte i brze promene opterećenja i režima rada. Potrošači energije koji se snabdevaju iz razmatranih postrojenja su zgrade, kako stambene, tako i komercijalne, zatim bolnice, hoteli, studentski domovi itd. Veoma bitna karakteristika svih razmatranih korisnika energije su značajne varijacije u potražnji svih oblika energije na dnevnom, nedeljnom i godišnjem nivou.

Radne karakteristike komponenata sa slike 3.1 zavise od više faktora: trenutnog opterećenja komponenata, stanja radnih fluida, stanja okolnog vazduha i dr. Pri matematičkom modeliranju komponenata, poželjno je uzeti u obzir ove zavisnosti sa što većom preciznošću.



Slika 3.1. Komponente i tokovi energije postrojenja za trigeneraciju

### 3.1.2. Tokovi energije i komponente

Tokovi energije i komponente su takođe šematski prikazani na slici 3.1. Energenti koji se dovode postrojenju su prirodni ili biogas za kogenerativne jedinice i kotlove, kao i električna energija preko transformatora. Proizvedena električna energija se može isporučiti mreži za distribuciju ili potrošačima. Deo preuzete ili proizvedene električne energije se potroši za rad samog postrojenja. Postrojenje takođe služi i za zadovoljenje

potreba potrošača za grejanjem i hlađenjem. Pretpostavka je da se celokupna potreba za grejanjem i hlađenjem mora zadovoljiti iz ovog postrojenja, dok se za snabdevanje električnom energijom može koristiti energija proizvedena u postrojenju ili preuzeta iz mreže za distribuciju.

Električna energija se proizvodi jedinicama za kogeneraciju, pri čemu se mali deo potroši za rad samog sistema: rad pumpi, ventilatora, uređaja za regulaciju i sl. Paralelno sa proizvodnjom električne energije, kogeneracijom se generiše i toplotna energija. Ukoliko se za kogeneraciju koriste gasni klipni motori, pretpostavlja se da se motori hlade pomoću dva kruga vode: (1) kruga visoke i (2) kruga niske temperature. Krug vode visoke temperature služi za hlađenje izduvnih gasova i motora, a zavisno od konstrukcije i za delimično ili potpuno hlađenje ulja i vazduha. Tako dobijena energija se može koristiti za grejanje korisnika, pogon apsorpcionih rashladnih mašina ili se skladištiti u toplom akumulatoru. Višak toplotne energije se može izbaciti u okolinu. Krug vode niske temperature služi, zavisno od konstrukcije, za delimično ili potpuno hlađenje ulja i vazduha. Energija ovog kruga vode bi se mogla koristiti npr. za podno grejanje ili toplotnu pumpu, ali ovde će se pretpostaviti da se u potpunosti odbacuje u okolinu. Neiskorišćena energija dobijena hlađenjem motora, ulja i vazduha se mora predati okolini da ne bi došlo do pregrevanja motora, a to se može postići prinudnom konvekcijom preko hladnjaka motora, za šta je potrebno utrošiti dodatnu električnu energiju za rad ventilatora, ili pomoću rashladnih tornjeva. Ukoliko se umesto gasnih motora koriste gasne turbine, toplotna energija se dobija samo hlađenjem izduvnih gasova.

Potrebe za grejanjem se mogu zadovoljiti i korišćenjem toplovodnih kotlova. Nije unapred definisano ko u snabdevanju toplotnom energijom ima prioritet: kogenerativne jedinice ili kotlovi, već se to određuje optimizacijom radnog režima postrojenja.

Potreba korisnika za hlađenjem se obezbeđuje korišćenjem apsorpcionih i kompresorskih rashladnih mašina. Apsorpcione rashladne mašine koriste toplotnu energiju dobijenu u motorima ili kotlovima, direktno ili nakon skladištenja u toplom akumulatoru. Ove mašine takođe koriste i relativno malu količinu električne energije za pogon pumpi i drugih električnih uređaja. Ovde će se razmatrati samo jednostepene indirektno apsorpcione mašine koje koriste toplu vodu. Kompresorske rashladne mašine koriste samo električnu energiju. Pretpostavljeno je da su sve rashladne mašine hladene vodom. Zbog toga je neophodno predvideti i rashladne tornjeve. Njihova uloga je odvođenje toplotne energije u okolinu, pre svega od rashladnih mašina, ali po potrebi i od motora za kogeneraciju. Prikazanim modelom bi se mogle predstaviti i vazduhom hladene rashladne mašine, što bi samo pojednostavilo problem jer se rashladni tornjevi ne bi morali razmatrati. Kao i u slučaju grejanja, prioritet pri hlađenju i način rada apsorpcionih i kompresorskih mašina se određuje optimizacijom radnog režima postrojenja.

Topli i hladni akumulatori se koriste za skladištenje i kasniju upotrebu viška energije. Akumulatori su modelirani tako da rade bez promene faza medijuma, a model najviše odgovara vertikalnim cilindričnim akumulatorima sa toplom ili hladnom vodom, pre svega sa mešanjem tečnosti, ali i sa stratifikacijom. Do gubitaka toplote kod toplih akumulatora i dobitaka kod hladnih dolazi kroz omotač, usled razlika temperatura medijuma i okoline, kao i tokom punjenja i pražnjenja.

## **3.2. Vremenski okvir**

Prikazani pristup optimizaciji postrojenja za snabdevanje energijom je pogodan kako za kratkoročnu optimizaciju radnih parametara, tako i za sveobuhvatnu optimizaciju strukture, projektnih i radnih parametara kada je potrebno razmatrati period od jedne ili više godina.

**Razmatrani period.** U slučaju optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara, razmatra se vremenski period jednak procenjenom životnom ili ekonomskom veku postrojenja koji se često aproksimira jednom tipičnom godinom.

**Obračunski periodi.** Razmatrani period se može podeliti na obračunske periode, tj. periode za koje se vrši obračun i naplata različitih troškova: za energente, održavanje, kredite itd. Obračunski periodi su najčešće meseci, ali mogu biti i godine. U jednostavnijim slučajevima često nije potrebno koristiti obračunske periode.

**Tipični periodi.** Razmatrani period i obračunski periodi se mogu aproksimirati jednim ili više tipičnih perioda od kojih svaki predstavlja više stvarnih perioda međusobno veoma sličnih u pogledu energetske potrebe korisnika, vremenskih uslova, cena energenata i drugih parametara koji se uzimaju u obzir. Tipični periodi su u literaturi najčešće tipični dani, mada se mogu koristiti i nedelje ili drugi periodi. Kao alternativa korišćenju tipičnih perioda može poslužiti pristup baziran na pokretnom periodu optimizacije.

**Projektni periodi.** Projektni periodi su slični tipičnim periodima po dužini trajanja: to su najčešće dani, ali mogu biti i nedelje i drugi periodi. Projektni periodi služe za proveru da li razmatrana konfiguracija postrojenja i projektni parametri mogu zadovoljiti ekstremne potrebe korisnika, npr. tokom najhladnijeg ili najtoplijeg dana u godini. Projektni period može istovremeno biti i tipični period.

**Vremenski koraci.** Tipični i projektni vremenski periodi su podeljeni na vremenske korake. Osnovne pretpostavke u vezi sa vremenskim koracima su sledeće:

- tokom jednog vremenskog koraka potrebe korisnika za električnom energijom,

grejanjem i hlađenjem su konstantne, kao i cene energenata, stanje okolnog vazduha i ostali ulazni parametri,

- tokom jednog vremenskog koraka rad svake komponente je stacionaran, osim eventualnih kratkih intervala puštanja u rad na početku i zaustavljanja na kraju vremenskog koraka,
- tokom jednog vremenskog koraka trenutna snaga, tj. opterećenje svake komponente, izraženo u [kW], je konstantno,
- temperature medijuma u akumulatorima se menjaju tokom vremenskog koraka u zavisnosti od dovedene i odvedene energije, kao i gubitaka/dobitaka kroz omotač, ali je količina dovedene i odvedene energije konstantna.

U literaturi se koriste vremenski koraci u trajanju od 1 min (nekada i kraće) do nekoliko časova. Sve analize prikazane u ovoj disertaciji su rađene za vremenski korak od 1 h, ali je prikazani pristup pogodan kako za duže, tako i za kraće vremenske korake.

Izbor broja tipičnih perioda i dužine koraka, s obzirom na to da njihovo uvođenje predstavlja aproksimaciju, je pitanje kompromisa između tačnosti sa jedne i vremena i resursa potrebnih za rešavanje problema sa druge strane. Više tipičnih perioda i kraći korak znače veću preciznost, ali i obimniji problem za čije rešavanje je potrebno više vremena. Minimalna dozvoljena dužina vremenskog koraka je uslovljena i potrebom da bude moguće sve razmatrane komponente osim akumulatora toplotne energije pustiti u rad do stacionarnog stanja ili zaustaviti tokom jednog vremenskog koraka.

### **3.3. Matematički model**

Prilikom kreiranja matematičkog modela koji će se koristiti u procesu optimizacije, neophodno je načiniti kompromis između:

- zahteva za preciznošću, fleksibilnošću i mogućnošću uzimanja u obzir što većeg broja uticajnih parametara i
- potrebe da model bude dovoljno jednostavan i definisan tako da se može primeniti određena tehnika optimizacije i obezbediti rešavanje problema u prihvatljivom vremenskom periodu i sa raspoloživim resursima.

Pomenuti kompromis predstavlja najveću razliku između matematičkih modela koji se koriste za optimizaciju i matematičkih modela korišćenih za simulacije, koji su oslobođeni ograničenja koja proizilaze iz potrebe za jednostavnošću i kao takvi obično znatno detaljniji i fleksibilniji.

Matematički model koji je prikazan u nastavku, osmišljen je upravo sa ciljem da se napravi što kvalitetniji kompromis i obezbedi što veća fleksibilnost prilikom matematičkog opisivanja postrojenja i procesa. Matematički model je definisan tako da se za rešavanje problema optimizacije mogu primeniti tehnike linearnog programiranja i mešovito celobrojnog linearnog programiranja sa svim svojim prednostima, dok se istovremeno fleksibilnost postiže mogućnošću varijacije cena, koeficijenata linearne regresije i drugih ulaznih parametara u svakom vremenskom koraku u zavisnosti od raznih uticajnih parametara.

Prikazani model u velikoj meri predstavlja sintezu dosadašnjih znanja i dostignuća u vezi sa matematičkim opisivanjem sličnih sistema i komponenata. Odlikuje se visokim nivoom detalja i fleksibilnošću. Pored toga, pojedini koncepti iz literature se uopštavaju i unapređuju kvalitativno i kvantitativno. To se pre svega odnosi na modeliranje nestacionarnog procesa puštanja u rad komponenata i odnose odgovarajućih binarnih veličina, kao i na sofisticiraniji model akumulatora energije koji je unapređen u odnosu na literaturu dodavanjem binarnih promenljivih i pratećih ograničenja.

Za transformaciju nelinearnih članova u linearne delom će se koristiti pristup koji je predložio Glover [172].

Matematički model razmatranog sistema za snabdevanje energijom čine jednačine i nejednačine koje predstavljaju:

- karakteristike i ponašanje pojedinačnih komponenata sistema i
- sintezu matematičkih modela komponenata, tj. kojima se definišu veze i uticaji među komponentama sistema.

### **3.3.1. Matematički modeli komponenata**

Matematički modeli komponenata sistema kreirani su tako da se mogu koristiti u mešovitim celobrojnim linearnim problemima optimizacije, istovremeno vodeći računa o nivou detalja. Konkretno, posebni ciljevi tokom definisanja ovih modela bili su:

- mogućnost uzimanja u obzir najvećeg broja uticajnih parametara koji se koriste u poznatim i vodećim softverima za simulacije zgrada i odgovarajućih sistema za snabdevanje energijom [43, 110, 173],
- mogućnost uzimanja u obzir konkretnih i preciznih ulaznih parametara: investicije, troškova održavanja, tehničkih radnih karakteristika i dr. za svaku razmatranu komponentu ponaosob, dobijenih od proizvođača ili merenjima, umesto generalizacije, uprošćavanja i aproksimacije parametara za skupove komponenata.

### 3.3.1.1. Nezavisno promenljive veličine i osnovna ograničenja

Nezavisno promenljive veličine koje se odnose na strukturu postrojenja i projektne parametre,  $\gamma_l$ , gde je  $l \in \{1, 2, \dots, n_\gamma\}$ , a  $n_\gamma$  broj ovih nezavisno promenljivih veličina, su diskretne i mogu biti:

- (1) binarne (0–1) bezdimenzione veličine kojima se definiše da li neki tip ili model komponente ulazi u sastav postrojenja,  $\gamma_l = 1$ , ili ne,  $\gamma_l = 0$ ,
- (2) nenegativne celobrojne bezdimenzione veličine kojima se definiše broj komponentata određenog modela koje ulaze u sastav postrojenja,  $\gamma_l \geq 1$ ,
- (3) diskretne bezdimenzione veličine, koje zavise od metode rešavanja problema imaju ili nemaju brojnu vrednost, kojima se definiše koji od ponuđenih modela komponentata ulaze u sastav postrojenja.

Takođe se mogu definisati diskretne nezavisno promenljive veličine kojima se vrši izbor paketa mera uštede energije na strani potrošača (poboljšanje termičkog omotača zgrada izolacijom ili zamenom stolarije, promena unutrašnje temperature, zamena uređaja za grejanje i hlađenje, svetiljki, električnih aparata i uređaja itd).

U prikazanom matematičkom modelu se razlikuju dve vrste nezavisno promenljivih veličina koje se odnose na radne režime:

- (1) binarne (0–1) bezdimenzione nezavisno promenljive veličine,  $\delta_k^{i,j}$ , kojima se definiše da li je posmatrana komponenta  $k$  uključena tokom vremenskog koraka  $j$  u periodu  $i$ , odnosno tokom vremenskog koraka  $i, j$ ,  $\delta_k^{i,j} = 1$  ili je isključena,  $\delta_k^{i,j} = 0$ ,
- (2) realne ( $\mathbb{R}$ ) nezavisno promenljive veličine, kojima se definišu trenutna opterećenja, tj. trenutne snage komponentata, izražene u [kW], i trenutne temperature medijuma u akumulatorima, osrednjene po zapremini, izražene u [°C].

Ukoliko je  $\gamma_l$  binarna nezavisno promenljiva veličina kojom se definiše da li je neka komponenta  $k$  uključena u postrojenje, tada je vrednost veličine  $\delta_k^{i,j}$  ograničena vrednošću  $\gamma_l$  u svakom vremenskom koraku  $i, j$ :

$$\delta_k^{i,j} \leq \gamma_l \quad \forall i, j \quad (3.1)$$

Svaka realna veličina  $x_k^{i,j}$  je ograničena prethodno definisanom minimalnom i maksimalnom vrednošću,  $x_{k,\min}^{i,j}$  i  $x_{k,\max}^{i,j}$ . Minimalna i maksimalna vrednost su izražene u istim jedinicama kao i odgovarajuća nezavisno promenljiva veličina i zavise od modela i kapaciteta komponente  $k$ , na koju se odnose, ali i drugih parametara kao što je stanje okolnog vazduha, temperatura fluida koji se dovodi u komponentu  $k$ , projektni parametri itd. Ove veličine mogu biti različite za razne vremenske korake, ali se smatraju poznatim,

tj. ulaznim parametrima kada su u pitanju problemi optimizacije radnog režima.

U opštem slučaju, moguće je definisati po dva para minimalne i maksimalne vrednosti za svaku realnu nezavisno promenljivu veličinu  $x_k^{i,j}$ . Jednim parom,  $(x_{k,\min}^{i,j}, x_{k,\max}^{i,j})$ , se ograničava vrednost  $x_k^{i,j}$  kada je odgovarajuća binarna nezavisno promenljiva veličina  $\delta_k^{i,j}$  jednaka 1, a drugim,  $(x_{k,\min}^{*i,j}, x_{k,\max}^{*i,j})$ , kada je  $\delta_k^{i,j} = 0$ :

$$x_{k,\min}^{*i,j} + \delta_k^{i,j} (x_{k,\min}^{i,j} - x_{k,\min}^{*i,j}) \leq x_k^{i,j} \leq x_{k,\max}^{*i,j} + \delta_k^{i,j} (x_{k,\max}^{i,j} - x_{k,\max}^{*i,j}) \quad \forall i, j \quad (3.2)$$

Poseban slučaj realnih nezavisno promenljivih veličina predstavljaju semi-kontinualne veličine koje su ograničene minimalnom i maksimalnom vrednošću ukoliko je  $\delta_k^{i,j} = 1$  i jednake nekoj drugoj vrednosti,  $x_k^{*i,j}$ , ako je  $\delta_k^{i,j} = 0$ :

$$x_k^{*i,j} + \delta_k^{i,j} (x_{k,\min}^{i,j} - x_k^{*i,j}) \leq x_k^{i,j} \leq x_k^{*i,j} + \delta_k^{i,j} (x_{k,\max}^{i,j} - x_k^{*i,j}) \quad \forall i, j \quad (3.3)$$

Ograničenja (3.3) su poseban slučaj ograničenja (3.2) za  $x_{k,\min}^{*i,j} = x_{k,\max}^{*i,j} = x_k^{*i,j}$ .

U opštem slučaju, realna nezavisno promenljiva veličina  $\dot{X}_k^{i,j}$ , izražena u [kW], koja predstavlja neki tok energije, tj. trenutno opterećenje komponente  $k$  u toku vremenskog koraka  $i, j$  je nenegativna ( $\mathbb{R}_0^+$ ) semi-kontinualna i ograničena minimalnom i maksimalnom vrednošću,  $\dot{X}_{k,\min}^{i,j}$  i  $\dot{X}_{k,\max}^{i,j}$ , ako je komponenta  $k$  uključena, tj.  $\delta_k^{i,j} = 1$ , odnosno jednaka 0 ako je komponenta  $k$  isključena, tj.  $\delta_k^{i,j} = 0$ :

$$0 \leq \delta_k^{i,j} \dot{X}_{k,\min}^{i,j} \leq \dot{X}_k^{i,j} \leq \delta_k^{i,j} \dot{X}_{k,\max}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.4)$$

Ograničenja (3.4) predstavljaju poseban slučaj ograničenja (3.3) za  $x_k^{*i,j} = 0$  i  $0 \leq \dot{X}_{k,\min}^{i,j} \leq \dot{X}_{k,\max}^{i,j}$ . Veličine  $\dot{X}_{k,\min}^{i,j}$  i  $\dot{X}_{k,\max}^{i,j}$  se takođe smatraju poznatim, tj. ulaznim u problem, kada je u pitanju optimizacija radnog režima. Poseban slučaj ograničenja (3.4) se javlja ako je  $\dot{X}_{k,\min}^{i,j} = 0$  ili  $\delta_k^{i,j} = 1$  za svaki vremenski korak  $i, j$ . Tada je  $\dot{X}_k^{i,j}$  obična kontinualna nezavisno promenljiva veličina.

Svakoј realnoj nezavisno promenljivoј veličini  $\dot{X}_k^{i,j}$ , koja predstavlja trenutno opterećenje komponente  $k$  u toku vremenskog koraka  $i, j$ , pridružena je zavisna veličina  $X_k^{i,j}$ , izražena u [kWh], koja predstavlja odgovarajući tok energije i definiše se kao:

$$X_k^{i,j} = \dot{X}_k^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.5)$$

### 3.3.1.2. Stacionaran rad komponenata

U slučaju stacionarnog rada komponente  $k$ , odnos zavisne veličine kojom se kvantifikuje neki tok energije, tj. trenutna snaga u toku vremenskog koraka  $i, j$ ,  $\dot{Y}_k^{i,j}$ , izražene u [kW], i nezavisno promenljivih veličina kojima se definiše opterećenje komponente  $k$ ,  $\dot{X}_{k,l}^{i,j}$ , se obično predstavlja linearnom funkcijom:

$$\dot{Y}_k^{i,j} = \sum_{l=1}^{n_x} a_{k,l}^{i,j} \dot{X}_{k,l}^{i,j} + b_k^{i,j} \delta_k^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.6)$$

gde su  $a_{k,l}^{i,j}$  i  $b_k^{i,j}$  koeficijenti linearne regresije, a  $n_x$  broj realnih nezavisno promenljivih veličina od kojih zavisi  $\dot{Y}_k^{i,j}$ . Koeficijenti linearne regresije se obično dobijaju iz podataka koje pružaju proizvođači za razmatrani model komponente, a mogu biti konstantni ili zavisni od ulaznih parametara kao što su temperature, pritisci itd. Moguće je definisati različite vrednosti ovih koeficijenata za svaki vremenski korak i na taj način uzeti u obzir i uticaj ostalih parametara, pre svega stanja okolnog vazduha, na radne karakteristike komponenata. U svakom slučaju, koeficijenti linearne regresije zavise samo od ulaznih parametara (ili su konstantni) i mogu se smatrati ulaznim veličinama kada je u pitanju problem optimizacije radnog režima.

Ovakav oblik je pogodan jer je, imajući u vidu nejednačine (3.4), za  $\delta_k^{i,j} = 0$  uvek  $\dot{X}_{k,l}^{i,j} = 0$ , za svaku vrednost  $l \in \{1, 2, \dots, n_x\}$ , i  $\dot{Y}_k^{i,j} = 0$ . Sličan pristup je često primenjivan u literaturi [65, 74, 75].

### 3.3.1.3. Linearna aproksimacija nelinearnih funkcija

Ukoliko linearna zavisnost iz jednačine (3.6) ne predstavlja dovoljno precizno odnos između veličina  $\dot{Y}_k^{i,j}$  i  $\dot{X}_{k,l}^{i,j}$ , može se definisati nelinearna zavisnost koja se aproksimira linearnim funkcijama. Aproksimacija nelinearnih funkcija linearnim može se izvesti na više načina. U tu svrhu često se koriste specijalni uređeni skupovi pomoćnih promenljivih veličina. Specijalni uređeni skup tipa 1 (SOS1) je skup čiji su svi elementi nenegativni, a samo jedan može biti veći od nule dok svi ostali moraju biti jednaki nuli. Specijalni uređeni skup tipa 2 (SOS2) je uređeni skup čiji su svi elementi nenegativni, a najviše dva člana, i to uzastopna, mogu biti veća od nule dok ostali moraju biti jednaki nuli.

Prvi način aproksimacije semi-kontinualne funkcije jedne nezavisno promenljive veličine opšteg oblika  $y = f(x)$ , gde je  $0 \leq x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$  za  $\delta_k^{i,j} = 1$  odnosno  $x = 0$  za  $\delta_k^{i,j} = 0$ , tj.  $0 \leq \delta_k^{i,j} x_{\min} \leq x \leq \delta_k^{i,j} x_{\max}$ , izlomljenom pravom linijom  $y_L$  podrazumeva primenu  $\lambda$ -formulacije koja je korišćena u radovima [33, 107]. Potrebno je izabrati

$n$  karakterističnih tačaka sa koordinatama  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ , takvih da je  $0 \leq x_{\min} = X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n = x_{\max}$ , koje će ograničavati i spajati  $n - 1$  segment izlomljene prave linije. Takođe treba uvesti  $n$  pomoćnih kontinualnih nenegativnih nezavisno promenljivih veličina,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  takvih da uređeni skup  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  bude SOS2. Linearna aproksimacija  $y_L$ , nezavisno promenljiva veličina  $x$  i neophodna dodatna ograničenja u problemu optimizacije su:

$$\begin{aligned} y_L &= \sum_{q=1}^n Y_q \lambda_q \\ x &= \sum_{q=1}^n X_q \lambda_q, \quad x \geq 0 \\ \sum_{q=1}^n \lambda_q &= \delta_k^{i,j}, \quad \lambda_q \geq 0, \quad \forall q \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) : \text{SOS2} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Ako je komponenta  $k$  uključena, tj.  $\delta_k^{i,j} = 1$ , jedna ili dve vrednosti  $\lambda_q$  će moći da budu veće od 0, kao i vrednost  $x$ . U suprotnom je  $\delta_k^{i,j} = 0$ , pa sve vrednosti  $\lambda_q$  moraju takođe da budu jednake 0, odakle sledi  $x = y_L = 0$ . Prilikom korišćenja ovog pristupa, opciono se mogu eliminisati iz razmatranja nezavisno promenljive veličine  $X_{k,l}^{i,j}$ , a  $X_{k,l}^{i,j}$  direktno izraziti pomoću odgovarajućih pomoćnih nezavisno promenljivih veličina  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ .

Koordinate karakterističnih tačaka mogu zavisiti od ulaznih parametara i biti različite za razne vremenske korake, baš kao i koeficijenti umesto kojih se koriste:  $a_{k,l}^{i,j}$  i  $b_k^{i,j}$ .

Iako programi za rešavanje problema mešovitog celobrojnog linearnog programiranja nekada efikasnije nalaze rešenja ukoliko su SOS2 skupovi eksplicitno definisani, oni se takođe mogu predstaviti pomoću dodatnih  $n - 1$  binarnih nezavisno promenljivih veličina,  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{n-1}$ , takvih da je:

$$\lambda_1 \leq \delta_1, \quad \lambda_q \leq \delta_{q-1} + \delta_q \quad \forall q \in \{2, 3, \dots, n-1\}, \quad \lambda_n \leq \delta_{n-1}, \quad \sum_{q=1}^{n-1} \delta_q \leq 1 \quad (3.8)$$

U slučaju da se u programu za rešavanje mešovitih celobrojnih linearnih problema optimizacije insistira na definiciji po kojoj suma svih elemenata skupova SOS1 i SOS2 mora da bude jednaka 1, potrebno je na početku uređenog skupa  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  dodati još jednu binarnu promenljivu  $\delta_k^{*i,j}$ , takvu da je  $\delta_k^{*i,j} = 1 - \delta_k^{i,j}$ . Takođe, poslednji uslov iz sistema

(3.7) treba zameniti uslovom:

$$\sum_{q=1}^n \lambda_q = 1 - \delta_k^{*i,j}, \quad \lambda_q \geq 0, \quad \forall q \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (\delta_k^*, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) : \text{SOS2} \quad (3.9)$$

Aproksimacije razdvojivih nelinearnih funkcija više nezavisno promenljivih veličina tipa  $y = \sum_{l=1}^{n_x} f_l(x_l)$  dobijaju se kao sume aproksimacija pojedinačnih funkcija jedne promenljive,  $f_l(x_l)$ , gde je  $l \in \{1, 2, \dots, n_x\}$ . Ako se veličine  $x_l$ , kao i  $y$ , odnose na istu komponentu  $k$ , potrebno je da za sve pojedinačne funkcije  $f_l$  promenljiva  $\delta_k^{i,j}$ , tj.  $\delta_k^{*i,j}$  bude zajednička, a sve ostale pomoćne veličine posebne.

Drugi način aproksimacije podrazumeva primenu  $\delta$ -formulacije i sličan je prvom načinu. Takođe se u slučaju funkcije jedne nezavisno promenljive veličine definiše  $n$  karakterističnih tačaka, odnosno  $n - 1$  segment. Za svaki segment je potrebno definisati po jednu pomoćnu nenegativnu kontinualnu nezavisno promenljivu veličinu,  $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$ , i po jednu binarnu nezavisno promenljivu veličinu,  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{n-1}$ . Linearna aproksimacija  $y_L$ , nezavisno promenljiva veličina  $x$  i neophodna dodatna ograničenja u problemu optimizacije su:

$$y_L = \sum_{q=1}^{n-1} \left( \frac{Y_{q+1} - Y_q}{X_{q+1} - X_q} (x_q - X_q \delta_q) + Y_q \delta_q \right)$$

$$x = \sum_{q=1}^{n-1} x_q, \quad x \geq 0, \quad \delta_q X_q \leq x_q \leq \delta_q X_{q+1}, \quad \forall q \in \{1, 2, \dots, n-1\} \quad (3.10)$$

$$\delta_k^{i,j} = \sum_{q=1}^{n-1} \delta_q$$

Jasno je da su skupovi  $\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{n-1}\}$  i  $\{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}\}$  SOS1 i mogu se, ali ne moraju, kao takvi i eksplicitno definisati. Kao i kod prvog načina, aproksimacije odvojivih funkcija više nezavisno promenljivih veličina određuju se kao sume aproksimacija pojedinačnih funkcija jedne promenljive,  $\delta_k^{i,j}$  je zajednička promenljiva, a ostale su posebne. Takođe se mogu eliminisati iz razmatranja nezavisno promenljive veličine  $\hat{X}_{k,l}^{i,j}$ , a  $X_{k,l}^{i,j}$  izraziti direktno pomoću odgovarajućih veličina  $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$ .

Treći način podrazumeva podelu celokupne oblasti definisanosti funkcije  $n_x$  nezavisno promenljivih veličina koja se aproksimira,  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_{n_x})$ , na segmente, kao i da se za svaki segment  $q$  pojedinačno definišu: jedna pomoćna binarna nezavisno promenljiva veličina,  $\delta_q$ ,  $n_x$  pomoćnih nenegativnih kontinualnih nezavisno promenljivih

veličina,  $x_{1,q}, x_{2,q}, \dots, x_{n_x,q}$ , i jednačina linearne aproksimacije razmatrane funkcije,  $y_{l,L,q} = \sum_{l=1}^{n_x} (a_{l,q} x_{l,q}) + b_q \delta_q$ . Ako je oblast definisanosti podeljena na  $n$  segmenata, gde su  $X_{l,q,\min}$  i  $X_{l,q,\max}$  vrednosti promenljive  $x_l$  na početku i kraju segmenta  $q$ , za sve vrednosti  $l \in \{1, 2, \dots, n_x\}$  i  $q \in \{1, 2, \dots, n\}$ , tada je:

$$\begin{aligned}
 y_L &= \sum_{q=1}^n \left( \sum_{l=1}^{n_x} (a_{l,q} x_{l,q}) + b_q \delta_q \right) \\
 x_l &= \sum_{q=1}^n x_{l,q}, \quad x_l \geq 0, \quad \forall l \in \{1, 2, \dots, n_x\} \\
 \delta_q X_{l,q,\min} &\leq x_{l,q} \leq \delta_q X_{l,q,\max}, \quad \forall l \in \{1, 2, \dots, n_x\}, \quad \forall q \in \{1, 2, \dots, n\} \\
 \delta_k^{i,j} &= \sum_{q=1}^n \delta_q
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Skupovi  $\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\}$  i  $\{x_{l,1}, x_{l,2}, \dots, x_{l,n}\}$ , za svaku vrednost  $l \in \{1, 2, \dots, n_x\}$ , su SOS1 i opciono mogu biti eksplicitno definisani kao takvi. I ovde se nezavisno promenljive veličine  $\dot{X}_{k,l}^{i,j}$  mogu eliminisati i potpuno zameniti pomoćnim veličinama  $x_{l,s}$ .

Osnovna prednost ovog pristupa je ta što se, za razliku od prethodna dva, može primeniti na funkcije više nezavisno promenljivih veličina koje nisu razdvojive. Ovaj način takođe pruža znatno veću fleksibilnost prilikom aproksimacije, pre svega po pitanju definisanja granica posmatranih segmenata koji čak ne moraju biti spojeni. Sa druge strane, to može dovesti do pojave da za iste vrednosti nezavisno promenljivih veličina na granicama segmenata, zavisno od izabranog segmenta, vrednost  $y_L$  bude drugačija. Takođe, u kompleksnijim slučajevima, primena ovog pristupa obično zahteva definisanje više pomoćnih binarnih promenljivih nego primena prethodna dva pristupa.

Broj izabranih tačaka, tj. segmenata predstavlja kompromis između potreba za preciznošću, tj. tačnošću sa jedne i efikasnošću sa druge strane. Ukoliko je oblast definisanosti podeljena na više segmenata, razlika između stvarne funkcije i njene linearne aproksimacije će biti manja, ali će broj pomoćnih nezavisno promenljivih veličina biti veći, a samim tim i vreme rešavanja problema.

### 3.3.1.4. Puštanje u rad i zaustavljanje komponenata

Nestacionaran rad komponenata tokom puštanja u rad i zaustavljanja može uticati na energetske tokove, bilanse i troškove, npr. na povećanje potrošnje goriva ili smanjenje dobijene količine energije. Uticaj puštanja u rad i zaustavljanja je uzet u obzir pod pretpostavkom da ovi procesi traju kraće od jednog vremenskog koraka za sve razmatrane komponente osim za akumulatore energije. U opštem slučaju, tok energije komponente  $k$  tokom vremenskog koraka  $i, j$ , predstavljen zavisnom veličinom  $Y_k^{i,j}$  i izražen u [kWh], predstavlja sumu energije tokom stacionarnog rada i korektivnih količina energije koje se odnose na puštanje komponente u rad i njeno zaustavljanje,  $Y_{\sigma,k}^{i,j}$  i  $Y_{\varsigma,k}^{i,j}$ , u [kWh]:

$$Y_k^{i,j} = \dot{Y}_k^{i,j} \tau + Y_{\sigma,k}^{i,j} + Y_{\varsigma,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.12)$$

gde je  $\tau$  trajanje vremenskog koraka, u [h]. Ovde je korišćen vremenski korak od 1 h, iako je prikazani pristup pogodan za korišćenje kako dužih, tako i kraćih vremenskih koraka. Veličine  $Y_{\sigma,k}^{i,j}$  i  $Y_{\varsigma,k}^{i,j}$  su definisane kao:

$$Y_{\sigma,k}^{i,j} = \sum_{l=1}^{n_{\sigma}} b_{\sigma,k,l}^{i,j} \delta_k^{i,j} \prod_{q=1}^l (1 - \delta_k^{i,j-q}) \quad \forall i, j \quad (3.13)$$

$$Y_{\varsigma,k}^{i,j} = b_{\varsigma,k}^{i,j} \delta_k^{i,j} (1 - \delta_k^{i,j+1}) \quad \forall i, j \quad (3.14)$$

gde je  $n_{\sigma}$  broj prethodnih vremenskih koraka uzetih u obzir, a  $b_{\sigma,k,l}^{i,j}$  i  $b_{\varsigma,k}^{i,j}$  odgovarajuće korektivne količine energije, izražene u [kWh]. Imajući u vidu jednačine (3.13) i (3.14), jednačina (3.12) se može predstaviti u obliku:

$$Y_k^{i,j} = \overbrace{\left( \sum_{l=1}^{n_x} a_{k,l}^{i,j} \dot{X}_{k,l}^{i,j} + b_k^{i,j} \delta_k^{i,j} \right) \tau}^{\text{Stacionaran rad}} + \underbrace{\sum_{l=1}^{n_{\sigma}} b_{\sigma,k,l}^{i,j} \delta_k^{i,j} \prod_{q=1}^l (1 - \delta_k^{i,j-q})}_{\text{Puštanje u rad}} + \underbrace{b_{\varsigma,k,1}^{i,j} \delta_k^{i,j} (1 - \delta_k^{i,j+1})}_{\text{Zaustavljanje}} \quad \forall i, j \quad (3.15)$$

Korektivna količina energije koja se odnosi na puštanje u rad neke komponente zavisi od toga koliko dugo je ona bila isključena. U radovima [65, 107] je uzet u obzir samo jedan prethodni vremenski korak, dok se u radu [135] pravi razlika između toplog i hladnog starta. Ovde je pristup sličan kao u softveru eQUEST [43], kao i u [128, 174], pa se

razmatraju prethodna tri vremenska koraka. Na taj način se, za dužinu vremenskog koraka od 1 h, mogu dobro aproksimirati vruć, topao i hladan start.

Podvučeni članovi jednačina (3.13)–(3.15) su nelinearni jer sadrže proizvode nezavisno promenljivih veličina. Da bi se problem transformisao u linearni potrebno je uvesti nove binarne nezavisno promenljive veličine i nejednačine veze. Za svaku binarnu nezavisno promenljivu veličinu  $\delta_k^{i,j}$  potrebno je uvesti sledeće nove pomoćne binarne nezavisno promenljive veličine:

$$\sigma_{k,1}^{i,j} = \delta_k^{i,j} (1 - \delta_k^{i,j-1}) \quad \forall i, j \quad (3.16a)$$

$$\sigma_{k,l}^{i,j} = \delta_k^{i,j} \prod_{q=1}^l (1 - \delta_k^{i,j-q}) = \sigma_{k,l-1}^{i,j} (1 - \delta_k^{i,j-l}) \quad \forall l \in \{2, 3, \dots, n_\sigma\} \quad \forall i, j \quad (3.16b)$$

$$\zeta_k^{i,j} = \delta_k^{i,j} (1 - \delta_k^{i,j+1}) \quad \forall i, j \quad (3.16c)$$

Pomoćna nezavisno promenljiva veličina  $\sigma_{k,1}^{i,j}$  pokazuje da li se komponenta  $k$  pušta u rad na početku vremenskog koraka  $i, j$ ,  $\sigma_{k,l}^{i,j}$  da li se pušta u rad posle mirovanja od najmanje  $l$  vremenskih koraka, a promenljiva  $\zeta_k^{i,j}$  da li se komponenta  $k$  zaustavlja na kraju vremenskog koraka  $i, j$ .

Uvođenje novih binarnih nezavisno promenljivih veličina ima smisla samo ukoliko se problemu optimizacije dodaju nova ograničenja, tj. nejednačine veze. Primena pristupa prikazanog u [108] podrazumeva dodavanje sledećih ograničenja za svaku promenljivu  $\delta_k^{i,j}$ :

$$\sigma_{k,1}^{i,j} \leq \delta_k^{i,j}, \quad \sigma_{k,1}^{i,j} \leq 1 - \delta_k^{i,j-1}, \quad \sigma_{k,1}^{i,j} \geq \delta_k^{i,j} - \delta_k^{i,j-1} \quad \forall i, j \quad (3.17a)$$

$$\sigma_{k,l}^{i,j} \leq \sigma_{k,l-1}^{i,j}, \quad \sigma_{k,l}^{i,j} \leq 1 - \delta_k^{i,j-l}, \quad \sigma_{k,l}^{i,j} \geq \sigma_{k,l-1}^{i,j} - \delta_k^{i,j-l} \quad \forall l \in \{2, 3, \dots, n_\sigma\} \quad \forall i, j \quad (3.17b)$$

$$\zeta_k^{i,j} \leq \delta_k^{i,j}, \quad \zeta_k^{i,j} \leq 1 - \delta_k^{i,j+1}, \quad \zeta_k^{i,j} \geq \delta_k^{i,j} - \delta_k^{i,j+1} \quad \forall i, j \quad (3.17c)$$

Iako su veličine  $\sigma_{k,l}^{i,j}$  i  $\zeta_k^{i,j}$  binarne, one ne moraju biti eksplicitno definisane kao takve, već je dovoljno da budu definisane kao kontinualne veličine u opsegu vrednosti od 0 do 1. Zahvaljujući ograničenjima (3.17), one će svakako implicitno morati da dobiju binarne vrednosti 0 ili 1. Ovo ne utiče na kvalitet rešenja, tj. tačnost, ali može značajno, pozitivno ili negativno, da utiče na vreme potrebno za rešavanje problema. Problemi koji se odnose na primere prikazane u ovoj disertaciji su efikasnije rešavani kada su pomenute veličine bile eksplicitno definisane kao binarne.

Takođe je moguće primeniti alternativni pristup, prikazan u [21], i umesto nejednačina

(3.17) koristiti nejednačine (3.18):

$$\sigma_{k,1}^{i,j} \leq 0,5 \left( \delta_k^{i,j} + 1 - \delta_k^{i,j-1} \right), \quad \sigma_{k,1}^{i,j} \geq \delta_k^{i,j} - \delta_k^{i,j-1} \quad \forall i, j \quad (3.18a)$$

$$\sigma_{k,l}^{i,j} \leq 0,5 \left( \sigma_{k,l-1}^{i,j} + 1 - \delta_k^{i,j-l} \right), \quad \sigma_{k,l}^{i,j} \geq \sigma_{k,l-1}^{i,j} - \delta_k^{i,j-l} \quad \forall l \in \{2, 3, \dots, n_\sigma\} \quad \forall i, j \quad (3.18b)$$

$$\zeta_k^{i,j} \leq 0,5 \left( \delta_k^{i,j} + 1 - \delta_k^{i,j+1} \right), \quad \zeta_k^{i,j} \geq \delta_k^{i,j} - \delta_k^{i,j+1} \quad \forall i, j \quad (3.18c)$$

Prikazani pristupi su funkcionalno ekvivalentni, tj, njihova primena bi rezultirala identičnim rešenjima, ali bi vreme rešavanja problema optimizacije moglo da se razlikuje. U ovom slučaju, prvi pristup se pokazao efikasnijim.

Uopšteno govoreći, svaki tok energije  $Y_k^{i,j}$  se može predstaviti kao funkcija realnih nezavisno promenljivih veličina za vremenski korak  $i, j$  i binarnih nezavisno promenljivih veličina za posmatrani, nekoliko prethodnih i jedan naredni vremenski korak:

$$Y_k^{i,j} = f \left( \dot{X}_{k,1}^{i,j}, \dot{X}_{k,2}^{i,j}, \dots, \dot{X}_{k,n_x}^{i,j}, \delta_k^{i,j}, \delta_k^{i,j-1}, \delta_k^{i,j-2}, \dots, \delta_k^{i,j-n_\sigma}, \delta_k^{i,j+1} \right) \quad \forall i, j \quad (3.19)$$

odnosno, kao linearna funkcija realnih, binarnih i pomoćnih nezavisno promenljivih veličina za posmatrani vremenski korak.

### 3.3.1.5. Ostala ograničenja

Kod komponenata kao što su kotlovi ili turbine većih snaga često je potrebno uzeti u obzir postojanje tehničkih ograničenja koja se odnose na maksimalnu dozvoljenu promenu opterećenja u toku jednog vremenskog koraka [63]. Ako je  $\dot{X}_k$  nezavisno promenljiva veličina koja predstavlja snagu, tj. opterećenje komponente  $k$ , a  $\Delta\dot{X}_k^-$  i  $\Delta\dot{X}_k^+$  redom maksimalan dozvoljeni pad i porast opterećenja komponente  $k$  u toku jednog vremenskog koraka, tada za svaki vremenski korak  $i, j$  važe ograničenja:

$$\dot{X}_k^{i,j-1} - \Delta\dot{X}_k^- \leq \dot{X}_k^{i,j} \leq \dot{X}_k^{i,j-1} + \Delta\dot{X}_k^+ \quad \forall i, j \quad (3.20)$$

Ukoliko se želi ograničiti vreme kontinualnog rada komponente  $k$  na minimalno  $n$  vremenskih koraka, gde je  $n \geq 2$ , potrebno je dodati sledeće ograničenje za svaki vremenski korak:

$$\sum_{q=j-n+1}^j \sigma_{k,1}^{i,q} \leq \delta_k^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.21)$$

a ako je potrebno ograničiti vreme tokom koga je komponenta  $k$  bila isključena na minimalno  $n$  vremenskih koraka, dodaje se sledeće ograničenje za svaki vremenski korak:

$$\sum_{q=j-n+1}^j \zeta_k^{i,q} \leq 1 - \delta_k^{i,j+1} \quad \forall i, j \quad (3.22)$$

Slična ograničenja prikazana su u radu [107]. Treba napomenuti da su ograničenja koja se dobijaju iz nejednakosti (3.21) i (3.22) za  $q = j$  takođe sadržana u sistemu nejednčina (3.17). Sličan efekat može se postići dodavanjem sledećih ograničenja:

$$\sigma_{k,1}^{i,j} + \zeta_k^{i,j} \leq 1, \quad \sigma_{k,1}^{i,j} + \zeta_k^{i,j+1} \leq 1, \quad \dots, \quad \sigma_{k,1}^{i,j} + \zeta_k^{i,j+n-2} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (3.23)$$

Prioritet pojedinih komponentata u odnosu na druge može se obezbediti dodavanjem jednostavnih ograničenja:

$$\delta_{k_1}^{i,j} \geq \delta_{k_2}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.24)$$

čime se postiže da se komponenta  $k_2$  nikada ne uključuje pre niti zaustavlja nakon komponente  $k_1$  [107]. Ovo može biti posebno korisno kada postoje dve ili više komponentata identičnih karakteristika, pa je nebitno koja će od njih imati prioritet, odnosno kada postoji više identičnih rešenja. Ova pojava se naziva simetrija. Dodavanjem ograničenja (3.24) se može izbeći pojava simetrije i značajno smanjiti skup mogućih rešenja koje je potrebno ispitati, a posledično i vreme potrebno za rešavanje problema. Treba naglasiti da moderni programi za rešavanje problema mešovitog celobrojnog linearnog programiranja često sadrže veoma efikasne heurističke procedure za nalaženje simetrije [107].

### 3.3.1.6. Troškovi rada i održavanja

Troškovi rada i održavanja komponentata, u koje ne ulaze troškovi energenata, u toku nekog vremenskog perida (godine ili obračunskog perioda), izražavaju se kao suma konstantnih troškova u toku tog perioda,  $Z_{OM,C,k}$ , i varijabilnih troškova,  $Z_{OM,V,k}$  [10]:

$$Z_{OM,T,k} = Z_{OM,C,k} + Z_{OM,V,k} = Z_{OM,C,k} + \sum_i \sum_j Z_{OM,V,k}^{i,j} \quad (3.25)$$

Konstantni troškovi zavise samo od modela komponente, dakle projektnih nezavisno promenljivih veličina, a varijabilni još i od načina rada. Varijabilni troškovi se iskazuju u zavisnosti od dobijene energije i vremena rada komponente i predstavljeni su linearnom

zavisnošću:

$$Z_{OM,V,k}^{i,j} = \left( \sum_{l=1}^{n_x} \alpha_{k,l}^{i,j} \dot{X}_{k,l}^{i,j} + \beta_k^{i,j} \delta_k^{i,j} \right) \tau \quad \forall i, j \quad (3.26)$$

gde su  $\alpha_{k,l}^{i,j}$  i  $\beta_k^{i,j}$  koeficijenti linearne regresije, dok  $\dot{X}_{k,l}^{i,j}$  predstavljaju  $n_x$  nezavisno promenljivih veličina kojima se definiše opterećenje komponente  $k$  u toku vremenskog koraka  $i, j$ , izraženih u [kW]. Moguće je uključiti i dodatne troškove održavanja koji se odnose na puštanje u rad i zaustavljanje komponentata [135], slično kao što je to urađeno sa potrošnjom energije.

### 3.3.1.7. Komponente za kogeneraciju

Predstavljeni matematički model se može primeniti na dva tipa kogenerativnih postrojenja: postrojenja sa klipnim motorima i postrojenja sa gasnim turbinama. Radne karakteristike pomenutih sistema za kogeneraciju zavise pre svega od trenutnog opterećenja, ali i od drugih parametara kao što je temperatura okolnog vazduha, atmosferski pritisak i nadmorska visina. Zavisnost karakteristika ovih komponentata od ulaznih parametara uglavnom se definiše za svaki model posebno, na osnovu podataka proizvođača.

Kada su u pitanju gasni motori, za svaku komponentu  $k$  predviđene su sledeće nezavisno promenljive veličine za svaki vremenski korak  $i, j$ :

- binarna nezavisno promenljiva veličina kojom se definiše da li je komponenta uključena ili isključena,  $\delta_{CG,k}^{i,j}$ ,
- trenutna električna snaga dobijena u generatoru,  $\dot{W}_{e,CG,k}^{i,j}$ , u [kW],
- iskorišćena toplotna snaga dobijena hlađenjem izduvnih gasova,  $\dot{Q}_{t,CG,XG,k}^{i,j}$ , u [kW],
- odbačena toplotna snaga iz kruga vode visoke temperature,  $\dot{Q}_{0,CG,HT,k}^{i,j}$ , u [kW],
- odbačena toplotna snaga iz kruga vode niske temperature,  $\dot{Q}_{0,CG,LT,k}^{i,j}$ , u [kW].

Električna energija dobijena u generatoru, iskorišćena toplotna energija od izduvnih gasova i odbačena toplotna energija iz krugova vode visoke i niske temperature za svaku

kogenerativnu jedinicu  $k$ , za svaki vremenski korak  $i, j$ , u [kWh], definišu se kao:

$$W_{e,CG,k}^{i,j} = \dot{W}_{e,CG,k}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.27)$$

$$Q_{t,CG,XG,k}^{i,j} = \dot{Q}_{t,CG,XG,k}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.28)$$

$$Q_{0,CG,HT,k}^{i,j} = \dot{Q}_{0,CG,HT,k}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.29)$$

$$Q_{0,CG,LT,k}^{i,j} = \dot{Q}_{0,CG,LT,k}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.30)$$

Trenutna električna snaga ograničena je zadatom minimalnom i maksimalnom dozvoljenom vrednošću,  $\dot{W}_{e,CG,k,\min}^{i,j}$  i  $\dot{W}_{e,CG,k,\max}^{i,j}$ , izraženim u [kW]:

$$\delta_{CG,k}^{i,j} \dot{W}_{e,CG,k,\min}^{i,j} \leq \dot{W}_{e,CG,k}^{i,j} \leq \delta_{CG,k}^{i,j} \dot{W}_{e,CG,k,\max}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.31)$$

Minimalna i maksimalna vrednost električne snage zavise pre svega od modela, tj. nominalnog kapaciteta mašine, ali se za svaki vremenski korak može korigovati u zavisnosti od temperature vazduha, atmosferskog pritiska ili nadmorske visine prema podacima proizvođača. U svakom slučaju, sa aspekta optimizacije radnog režima ove vrednosti zavise samo od ulaznih parametara, pa se i same mogu smatrati poznatim veličinama.

Ukoliko se za kogeneraciju koriste gasni klipni motori, toplotna energija se dobija iz više izvora:

- hlađenjem izduvnih gasova,
- hlađenjem motora,
- hlađenjem ulja za podmazivanje,
- hlađenjem vazduha nakon kompresije a pre ubacivanja u motor.

Kao što je već rečeno, pretpostavljeno je da se dobijena toplotna energija odvodi od motora pomoću kruga vode visoke i niske temperature, pri čemu krug vode visoke temperature služi za hlađenje izduvnih gasova i motora, dok se hlađenje ulja i vazduha može obavljati pomoću jednog ili oba kruga rashladne vode, zavisno od konstrukcije. U zavisnosti od predviđenog radnog režima i potreba potrošača, odvedena toplotna energija se može iskoristiti ili izbaciti u okolinu.

Dobijena toplotna energija, izražena u [kWh], podeljena je prema izvorima i izmenjivačima toplote na sledeće komponente:

- ukupna toplotna energija dobijena hlađenjem izduvnih gasova,  $Q_{t,CG,XGT,k}^{i,j}$ ,

- toplotna energija dobijena hlađenjem motora,  $Q_{t,CG,JWC,k}^{i,j}$ ,
- toplotna energija dobijena hlađenjem ulja za podmazivanje u 1. fazi,  $Q_{t,CG,LC1,k}^{i,j}$ ,
- toplotna energija dobijena hlađenjem vazduha u 1. fazi,  $Q_{t,CG,TC1,k}^{i,j}$ ,
- toplotna energija dobijena hlađenjem ulja za podmazivanje u 2. fazi,  $Q_{t,CG,LC2,k}^{i,j}$ ,
- toplotna energija dobijena hlađenjem vazduha u 2. fazi,  $Q_{t,CG,TC2,k}^{i,j}$ .

Zavisnost dobijene toplotne energije od opterećenja komponente, tj. dobijene električne snage za svaki vremenski korak  $i, j$  se može predstaviti linearnim jednačinama (3.32):

$$Q_{t,CG,XGT,k}^{i,j} = \left( a_{t,CG,XGT,k}^{i,j} W_{e,CG,k}^{i,j} + b_{t,CG,XGT,k}^{i,j} \delta_{CG,k}^{i,j} \right) \tau \quad \forall i, j \quad (3.32a)$$

$$Q_{t,CG,JWC,k}^{i,j} = \left( a_{t,CG,JWC,k}^{i,j} W_{e,CG,k}^{i,j} + b_{t,CG,JWC,k}^{i,j} \delta_{CG,k}^{i,j} \right) \tau \quad \forall i, j \quad (3.32b)$$

$$Q_{t,CG,LC1,k}^{i,j} = \left( a_{t,CG,LC1,k}^{i,j} W_{e,CG,k}^{i,j} + b_{t,CG,LC1,k}^{i,j} \delta_{CG,k}^{i,j} \right) \tau \quad \forall i, j \quad (3.32c)$$

$$Q_{t,CG,TC1,k}^{i,j} = \left( a_{t,CG,TC1,k}^{i,j} W_{e,CG,k}^{i,j} + b_{t,CG,TC1,k}^{i,j} \delta_{CG,k}^{i,j} \right) \tau \quad \forall i, j \quad (3.32d)$$

$$Q_{t,CG,LC2,k}^{i,j} = \left( a_{t,CG,LC2,k}^{i,j} W_{e,CG,k}^{i,j} + b_{t,CG,LC2,k}^{i,j} \delta_{CG,k}^{i,j} \right) \tau \quad \forall i, j \quad (3.32e)$$

$$Q_{t,CG,TC2,k}^{i,j} = \left( a_{t,CG,TC2,k}^{i,j} W_{e,CG,k}^{i,j} + b_{t,CG,TC2,k}^{i,j} \delta_{CG,k}^{i,j} \right) \tau \quad \forall i, j \quad (3.32f)$$

pri čemu se koeficijentima linearne regresije mogu uzeti u obzir i druge ulazne veličine, npr. stanje okolnog vazduha i nadmorska visina.

Ukupna toplotna energija predata krugu vode visoke temperature u toku vremenskog koraka  $i, j$ ,  $Q_{t,CG,HT,k}^{i,j}$ , i ukupna toplotna energija predata krugu vode niske temperature,  $Q_{t,CG,LT,k}^{i,j}$ , izražene u [kWh], iznose:

$$Q_{t,CG,HT,k}^{i,j} = Q_{t,CG,XG,k}^{i,j} + Q_{t,CG,JWC,k}^{i,j} + Q_{t,CG,LC1,k}^{i,j} + Q_{t,CG,TC1,k}^{i,j} - Q_{0,CG,HT,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.33)$$

$$Q_{t,CG,LT,k}^{i,j} = Q_{t,CG,LC2,k}^{i,j} + Q_{t,CG,TC2,k}^{i,j} - Q_{0,CG,LT,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.34)$$

Kod motora, sav višak toplotne energije se mora izbaciti u okolinu kako ne bi došlo do pregrevanja, iskorišćena toplotna energija izduvnih gasova ne može biti veća od ukupne dobijene energije, a takođe ni vrednosti toplotne energije predate krugovima vode visoke i niske temperature ne smeju biti negativne, pa u svakom vremenskom koraku moraju važiti

sledeća ograničenja:

$$Q_{t,CG,XG,k}^{i,j} \leq Q_{t,CG,XGT,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.35)$$

$$Q_{0,CG,HT,k}^{i,j} \leq Q_{t,CG,XG,k}^{i,j} + Q_{t,CG,JWC,k}^{i,j} + Q_{t,CG,LC1,k}^{i,j} + Q_{t,CG,TC1,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.36)$$

$$Q_{0,CG,LT,k}^{i,j} \leq Q_{t,CG,LC2,k}^{i,j} + Q_{t,CG,TC2,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.37)$$

Čest je slučaj da se toplotna energija iz kruga niske temperature ne može iskoristiti, pa se u potpunosti predaje okolini. Tada mora da važi ograničenje:

$$Q_{t,CG,LT,k}^{i,j} = 0 \quad \text{tj.} \quad Q_{0,CG,LT,k}^{i,j} = Q_{t,CG,LC2,k}^{i,j} + Q_{t,CG,TC2,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.38)$$

Potrošnja goriva motora  $k$  u toku vremenskog koraka  $i, j$ ,  $Q_{f,CG,k}^{i,j}$ , u [kWh], na osnovu donje toplotne moći goriva, takođe zavisi od opterećenja motora i može se izraziti kao:

$$Q_{f,CG,k}^{i,j} = \left( a_{f,CG,k}^{i,j} W_{e,CG,k}^{i,j} + b_{f,CG,k}^{i,j} \delta_{CG,k}^{i,j} \right) \tau + Q_{\sigma,f,CG,k}^{i,j} + Q_{\zeta,f,CG,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.39)$$

Električna energija utrošena za pogon pumpi, ventilatora i sl, u toku vremenskog koraka  $i, j$ ,  $W_{x,CG,k}^{i,j}$ , u [kWh], zavisi od opterećenja motora, ali i od neiskorišćene toplotne energije koja se prinudnom konvekcijom predaje okolini:

$$\frac{W_{x,CG,k}^{i,j}}{\tau} = \left( a_{0,CG,HT,k}^{i,j} \dot{Q}_{0,CG,HT,k}^{i,j} + a_{0,CG,LT,k}^{i,j} \dot{Q}_{0,CG,LT,k}^{i,j} + a_{x,CG,k}^{i,j} W_{e,CG,k}^{i,j} + b_{x,CG,k}^{i,j} \delta_{CG,k}^{i,j} \right) \quad \forall i, j \quad (3.40)$$

Koeficijenti linearne regresije korišćeni u jednačinama (3.39) i (3.40) takođe mogu biti različiti za različite vremenske korake i određeni u zavisnosti od ulaznih parametara.

Ukoliko se neiskorišćena energija predaje okolini u zasebnim rashladnim tornjevima, prva dva člana sa desne strane jednačine (3.40) se zanemaruju. Moguće je uvesti još dve nezavisno promenljive veličine za svaki vremenski korak i odvojiti količine toplote iz motora koje se odvođe sopstvenim hladnjacima od onih koje se odvođe rashladnim tornjevima.

Neto raspoloživa električna energija tokom vremenskog koraka  $i, j$ ,  $W_{e,CG,N,k}^{i,j}$ , u [kWh] je:

$$W_{e,CG,N,k}^{i,j} = W_{e,CG,k}^{i,j} - W_{x,CG,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.41)$$

Opciono se mogu dodati ograničenja da ova veličina bude nenegativna za svaki vremenski korak.

Ukoliko je reč o gasnim turbinama, na njih se može primeniti isti matematički model kao za motore, s tim što se, kada je reč o toplotnom izlazu, u obzir uzima samo toplotna snaga dobijena hlađenjem izduvnih gasova, nezavisno promenljive veličine i ograničenja u vezi sa njom.

### 3.3.1.8. Veza sa mrežom za distribuciju električne energije

Preuzimanje električne energije iz mreže za distribuciju i predaja električne energije mreži se obavlja preko transformatora električne energije čija je funkcija takođe i promena napona. Na njih se odnose sledeće nezavisno promenljive veličine za svaki vremenski korak  $i, j$ :

- binarna nezavisno promenljiva veličina kojom se definiše da li je dozvoljeno preuzimanje električne energije iz mreže,  $\delta_{ET,I}^{i,j}$ ,
- binarna nezavisno promenljiva veličina kojom se definiše da li je dozvoljena predaja električne energije mreži,  $\delta_{ET,E}^{i,j}$ ,
- preuzeta električna snaga iz mreže, posle izlaza iz transformatora,  $\dot{W}_{e,I,N}^{i,j}$ , u [kW],
- predata električna snaga mreži, posle izlaza iz transformatora,  $\dot{W}_{e,E,N}^{i,j}$ , u [kW].

Preuzeta električna energija i energija predata mreži, posle izlaza iz transformatora, za svaki vremenski korak  $i, j$ , u [kWh], definišu se kao:

$$W_{e,I,N}^{i,j} = \dot{W}_{e,I,N}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.42)$$

$$W_{e,E,N}^{i,j} = \dot{W}_{e,E,N}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.43)$$

Kod transformatora električne energije su uzeta u obzir dva najznačajnija tipa gubitaka koji se javljaju prilikom njihovog napajanja električnom energijom: (1) gubitak u jezgru koji je približno konstantan i (2) gubitak u namotajima koji zavisi od opterećenja transformatora i može se korigovati na osnovu temperature okolnog vazduha [110]. Imajući u vidu ove gubitke, definišu se preuzeta energija iz mreže i predata energija mreži pre izlaza iz transformatora za svaki vremenski korak  $i, j$ , u [kWh]:

$$W_{e,I,G}^{i,j} = \left( a_{e,ET,I}^{i,j} \dot{W}_{e,I,N}^{i,j} + b_{e,ET,I}^{i,j} \delta_{ET,I}^{i,j} \right) \tau \quad \forall i, j \quad (3.44)$$

$$W_{e,E,G}^{i,j} = \left( a_{e,ET,E}^{i,j} \dot{W}_{e,E,N}^{i,j} + b_{e,ET,E}^{i,j} \delta_{ET,E}^{i,j} \right) \tau \quad \forall i, j \quad (3.45)$$

Ukoliko linearna zavisnost ne predstavlja dovoljno precizno odnos opterećenja transformatora i gubitka u namotajima, može se definisati nelinearna zavisnost i

primeniti linearna aproksimacija.

Količine preuzete i predate energije su ograničene predefinisanim maksimalnim vrednostima,  $\dot{W}_{e,I,N,\max}^{i,j}$  i  $\dot{W}_{e,E,N,\max}^{i,j}$ , izraženim u [kW], određenim na osnovu kapaciteta transformatora, izraženog u [kVA]:

$$\dot{W}_{e,I,N}^{i,j} \leq \delta_{ET,I}^{i,j} \dot{W}_{e,I,N,\max}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.46)$$

$$\dot{W}_{e,E,N}^{i,j} \leq \delta_{ET,E}^{i,j} \dot{W}_{e,E,N,\max}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.47)$$

Ukoliko je predviđena i naplata preuzete električne energije prema vršnoj snazi, potrebno je uvesti još jednu nezavisno promenljivu veličinu za svaki obračunski period  $u$ : preuzetu vršnu snagu,  $\dot{W}_{e,I,\text{Cap}}^u$ , izraženu u [kW], i dodati još po jednu nejednačinu za svaki vremenski korak  $i, j$  iz obračunskog perioda  $u$ :

$$W_{e,I,G}^{i,j} \leq \dot{W}_{e,I,\text{Cap}}^u \tau \quad \forall u, \forall i, j \in u \quad (3.48)$$

što će implicirati (pod uslovom da važi trivijalna pretpostavka da naplata prema vršnoj snazi generiše rashode na strani onoga ko preuzima električnu energiju):

$$\dot{W}_{e,I,\text{Cap}}^u \tau = \max_{i,j} W_{e,I,G}^{i,j} \quad \forall u, \forall i, j \in u \quad (3.49)$$

Isporučena, tj. predata električna energija je ograničena proizvodnjom razmatranog sistema u svakom posmatranom vremenskom koraku  $i, j$ . Bruto isporučena električna energija (pre nastanka gubitaka u transformatoru) ne može biti veća od električne energije proizvedene u postrojenju, što je prikazano nejednačinom (3.50), a opciono se može ograničiti mogućnost isporuke električne energije ili rada transformatora radom jedinica za kogeneraciju nejednačinom (3.51):

$$W_{e,E,G}^{i,j} \leq \sum_{k=1}^{n_{CG}} W_{e,CG,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.50)$$

$$\delta_{ET,E}^{i,j} \leq \sum_{k=1}^{n_{CG}} \delta_{CG,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.51)$$

Ukoliko nije predviđena mogućnost da se električna energija istovremeno preuzima i predaje mreži, uvodi se sledeće ograničenje za svaki vremenski korak  $i, j$ :

$$\delta_{ET,I}^{i,j} + \delta_{ET,E}^{i,j} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (3.52)$$

Za svaki vremenski korak  $i, j$ , električna energija razmenjena sa mrežom,  $W_{e,Grid}^{i,j}$ , izražena u [kWh] iznosi:

$$W_{e,Grid}^{i,j} = W_{e,I,N}^{i,j} - W_{e,E,G}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.53)$$

### 3.3.1.9. Kotlovi

Matematički model toplovodnih kotlova je relativno jednostavan. Uzeta je u obzir zavisnost radnih karakteristika od opterećenja. Posredno, preko koeficijenata linearne regresije se mogu uzeti u obzir i drugi uticaji, npr. temperatura polazne ili povratne vode.

Za svaki kotao  $k$  predviđene su sledeće nezavisno promenljive veličine za svaki posmatrani vremenski korak  $i, j$ :

- binarna nezavisno promenljiva veličina kojom se definiše da li je kotao uključen ili isključen,  $\delta_{CH,k}^{i,j}$ ,
- trenutna toplotna snaga dobijena u kotlu,  $\dot{Q}_{t,CH,k}^{i,j}$ , u [kW].

Toplotna energija dobijena u svakom kotlu  $k$ , za svaki vremenski korak  $i, j$ , u [kWh], definiše se kao:

$$Q_{t,CH,k}^{i,j} = \dot{Q}_{t,CH,k}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.54)$$

Trenutna toplotna snaga kotla ograničena je zadatom minimalnom i maksimalnom dozvoljenom vrednošću,  $\dot{Q}_{t,CH,k,\min}^{i,j}$  i  $\dot{Q}_{t,CH,k,\max}^{i,j}$ , izraženim u [kW]:

$$\delta_{CH,k}^{i,j} \dot{Q}_{t,CH,k,\min}^{i,j} \leq \dot{Q}_{t,CH,k}^{i,j} \leq \delta_{CH,k}^{i,j} \dot{Q}_{t,CH,k,\max}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.55)$$

Potrošnja goriva kotla i potrebna količina električne energije za rad električnih uređaja za svaki vremenski korak  $i, j$ , u [kWh] su:

$$Q_{f,CH,k}^{i,j} = \left( a_{f,CH,k}^{i,j} \dot{Q}_{t,CH,k}^{i,j} + b_{f,CH,k}^{i,j} \delta_{CH,k}^{i,j} \right) \tau + Q_{\sigma,f,CH,k}^{i,j} + Q_{\zeta,f,CH,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.56)$$

$$W_{x,CH,k}^{i,j} = \left( a_{x,CH,k}^{i,j} \dot{Q}_{t,CH,k}^{i,j} + b_{x,CH,k}^{i,j} \delta_{CH,k}^{i,j} \right) \tau + W_{\sigma,x,CH,k}^{i,j} + W_{\zeta,x,CH,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.57)$$

### 3.3.1.10. Komponente za hlađenje

Razmatrane komponente za hlađenje su apsorpcione rashladne mašine, kompresorske rashladne mašine i rashladni tornjevi. Pretpostavljeno je da su rashladne mašine hlađene vodom preko rashladnih tornjeva, ali prikazani matematički model može biti primenjen i na mašine hlađene vazduhom. Od apsorpcionih rashladnih mašina, razmatrane su samo mašine koje koriste toplu vodu kao izvor toplotne energije, ali se model može koristiti i kada su u pitanju ostali tipovi ovih mašina.

Nezavisno promenljive veličine koje se odnose na radne režime komponenata za hlađenje, u svakom posmatranom vremenskom koraku  $i, j$  su:

- binarna nezavisno promenljiva veličina za svaku apsorpcionu rashladnu mašinu  $k$  kojom se definiše da li je uključena ili isključena,  $\delta_{AR,k}^{i,j}$ ,
- trenutni rashladni učinak svake apsorpcione rashladne mašine  $k$ ,  $\dot{Q}_{r,AR,k}^{i,j}$ , u [kW],
- binarna nezavisno promenljiva veličina za svaku kompresorsku rashladnu mašinu  $k$  kojom se definiše da li je uključena ili isključena,  $\delta_{CR,k}^{i,j}$ ,
- trenutni rashladni učinak svake kompresorske rashladne mašine  $k$ ,  $\dot{Q}_{r,CR,k}^{i,j}$ , u [kW],
- binarna nezavisno promenljiva veličina za svaki rashladni toranj  $k$  kojom se definiše da li je uključen ili isključen,  $\delta_{CT,k}^{i,j}$ ,
- trenutna toplotna snaga odvedena svakim rashladnim tornjem  $k$ ,  $\dot{Q}_{r,CT,k}^{i,j}$ , u [kW].

Toplotna energija hlađenja za svaku apsorpcionu i kompresorsku mašinu, kao i odvedena toplotna energija svakim rashladnim tornjem, za svaki vremenski korak  $i, j$ , u [kWh], definišu se kao:

$$Q_{r,AR,k}^{i,j} = \dot{Q}_{r,AR,k}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.58)$$

$$Q_{r,CR,k}^{i,j} = \dot{Q}_{r,CR,k}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.59)$$

$$Q_{r,CT,k}^{i,j} = \dot{Q}_{r,CT,k}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.60)$$

Radne karakteristike rashladnih mašina, pre svega rashladni kapacitet i koeficijent hlađenja, zavise od trenutnog opterećenja, tj. rashladnog učinka, ali i od drugih veličina koje se smatraju poznatim prilikom optimizacije radnog režima:

- temperatura hlađene vode na izlazu iz isparivača,
- temperatura rashladne vode ili vazduha (u slučaju mašina hlađenih vazduhom) na ulazu u kondenzator,

- u slučaju apsorpcionih rashladnih mašina, temperature toplog fluida na ulazu u generator.

Rashladni učinci apsorpcionih i kompresorskih mašina ograničeni su zadatim minimalnim i maksimalnim vrednostima koje se mogu odrediti iz podataka proizvođača u zavisnosti od pomenutih ulaznih veličina:

$$\delta_{AR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,AR,k,\min}^{i,j} \leq \dot{Q}_{r,AR,k}^{i,j} \leq \delta_{AR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,AR,k,\max}^{i,j} \quad \forall i,j \quad (3.61)$$

$$\delta_{CR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,CR,k,\min}^{i,j} \leq \dot{Q}_{r,CR,k}^{i,j} \leq \delta_{CR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,CR,k,\max}^{i,j} \quad \forall i,j \quad (3.62)$$

Za pogon apsorpcionih rashladnih mašina se koristi toplotna energija i manja količina električne energije za električne uređaje (npr. pumpe), dok se za pogon kompresorskih rashladnih mašina koristi samo električna energija. Ove količine energije, izražene u [kWh], mogu se za svaki vremenski korak  $i,j$  definisati kao zavisne od trenutnog opterećenja i ulaznih parametara:

$$Q_{t,AR,k}^{i,j} = \left( a_{t,AR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,AR,k}^{i,j} + b_{t,AR,k}^{i,j} \delta_{AR,k}^{i,j} \right) \tau + Q_{\sigma,t,AR,k}^{i,j} + Q_{\zeta,t,AR,k}^{i,j} \quad \forall i,j \quad (3.63)$$

$$W_{x,AR,k}^{i,j} = \left( a_{x,AR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,AR,k}^{i,j} + b_{x,AR,k}^{i,j} \delta_{AR,k}^{i,j} \right) \tau + W_{\sigma,x,AR,k}^{i,j} + W_{\zeta,x,AR,k}^{i,j} \quad \forall i,j \quad (3.64)$$

$$W_{x,CR,k}^{i,j} = \left( a_{x,CR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,CR,k}^{i,j} + b_{x,CR,k}^{i,j} \delta_{CR,k}^{i,j} \right) \tau + W_{\sigma,x,CR,k}^{i,j} + W_{\zeta,x,CR,k}^{i,j} \quad \forall i,j \quad (3.65)$$

Toplotna energija koju je potrebno odvesti u okolinu preko kondenzatora rashladnih mašina, a zatim i rashladnih tornjeva može se približno odrediti kao suma rashladnog učinka i dovedene količine energije. Ovde su izrazi za odvedene količine energije apsorpcionih i kompresorskih mašina, u [kWh], dati u nešto kompleksnijem obliku, uzimajući u obzir da se deo dovedene energije može izgubiti i pre nego što se preda rashladnom fluidu, kao i dodatnu energiju koja se dovede tokom puštanja u rad i zaustavljanja mašina:

$$\begin{aligned} Q_{0,AR,k}^{i,j} = & \left( a_{0,AR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,AR,k}^{i,j} + b_{0,AR,k}^{i,j} \delta_{AR,k}^{i,j} \right) \tau \\ & + a_{0,\sigma,t,AR,k}^{i,j} Q_{\sigma,t,AR,k}^{i,j} + a_{0,\sigma,x,AR,k}^{i,j} W_{\sigma,x,AR,k}^{i,j} + b_{0,\sigma,AR,k}^{i,j} \sigma_{AR,k,1}^{i,j} \\ & + a_{0,\zeta,t,AR,k}^{i,j} Q_{\zeta,t,AR,k}^{i,j} + a_{0,\zeta,x,AR,k}^{i,j} W_{\zeta,x,AR,k}^{i,j} + b_{0,\zeta,AR,k}^{i,j} \zeta_{AR,k}^{i,j} \quad \forall i,j \end{aligned} \quad (3.66)$$

$$\begin{aligned} Q_{0,CR,k}^{i,j} = & \left( a_{0,CR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,CR,k}^{i,j} + b_{0,CR,k}^{i,j} \delta_{CR,k}^{i,j} \right) \tau \\ & + a_{0,\sigma,x,CR,k}^{i,j} W_{\sigma,x,CR,k}^{i,j} + b_{0,\sigma,CR,k}^{i,j} \sigma_{CR,k,1}^{i,j} \\ & + a_{0,\zeta,x,CR,k}^{i,j} W_{\zeta,x,CR,k}^{i,j} + b_{0,\zeta,CR,k}^{i,j} \zeta_{CR,k}^{i,j} \quad \forall i,j \end{aligned} \quad (3.67)$$

Model rashladnih tornjeva odgovara kako otvorenim tornjevima sa direktnim kontaktom vode sa atmosferom, tako i tornjevima sa zatvorenim krugom vode, tj. indirektnim kontaktom. Pogodan je za tornjeve sa ventilatorima konstantnog i promenljivog protoka.

Radne karakteristike rashladnih tornjeva zavise od konstrukcije, opterećenja, protoka vode, temperature vode na ulazu i izlazu, protoka vazduha, temperature okolnog vazduha po suvom i vlažnom termometru itd.

Toplotna snaga odvedena preko rashladnog tornja ograničena je predefinisanom maksimalnom vrednošću,  $\dot{Q}_{r,CT,k,max}$ , izraženom u [kW]:

$$\dot{Q}_{r,CT,k}^{i,j} \leq \delta_{CT,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,CT,k,max}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.68)$$

Pomoću rashladnih tornjeva se odvodi celokupna energija iz svih vodom hlađenih rashladnih mašina i, eventualno, višak toplotne energije iz motora za kogeneraciju, pa za svaki vremenski korak  $i, j$  važi:

$$\sum_{k=1}^{n_{CT}} Q_{r,CT,k}^{i,j} = \sum_{k=1}^{n_{AR}} Q_{0,AR,k}^{i,j} + \sum_{k=1}^{n_{CR}} Q_{0,CR,k}^{i,j} + \sum_{k=1}^{n_{CG}} (Q_{0,CG,HT,k}^{i,j} + Q_{0,CG,LT,k}^{i,j}) \quad \forall i, j \quad (3.69)$$

Ukoliko se motori hlade sopstvenim hladnjacima, poslednji član sa desne strane jednačine (3.69) se zanemaruje.

Potrošnja električne energije rashladnih tornjeva u svakom vremenskom koraku  $i, j$ , izražena u [kWh] se pretežno odnosi na rad ventilatora i određuje kao:

$$W_{x,CT,k}^{i,j} = \left( a_{x,CT,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,CT,k}^{i,j} + b_{x,CT,k}^{i,j} \delta_{CT,k}^{i,j} \right) \tau + W_{\sigma,x,CT,k}^{i,j} + W_{s,x,CT,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.70)$$

Potrošnja vode u rashladnim tornjevima se računa u troškove rada i održavanja.

### 3.3.1.11. Akumulatori toplotne energije

U obzir su uzeti topli i hladni akumulatori toplotne energije bez promene faza medijuma koji služi za skladištenje energije. Prikazani model najviše odgovara vertikalnim akumulatorima sa vodom i mešanjem, ali se može koristiti i za stratifikovane akumulatore, kao i za akumulatore sa drugim medijumima.

Nezavisno promenljive veličine koje se odnose na radne režime akumulatora toplotne energije za svaki vremenski korak  $i, j$  su:

- brzina punjenja toplog akumulatora energije,  $\dot{Q}_{t,TS,I}^{i,j}$ , u [kW],
- brzina pražnjenja toplog akumulatora energije,  $\dot{Q}_{t,TS,E}^{i,j}$ , u [kW],
- srednja temperatura medijuma toplog akumulatora energije na početku vremenskog koraka  $i, j$ ,  $t_{TS}^{i,j}$ , u [°C],
- brzina punjenja hladnog akumulatora energije,  $\dot{Q}_{r,RS,E}^{i,j}$ , u [kW],
- brzina pražnjenja hladnog akumulatora energije,  $\dot{Q}_{r,RS,I}^{i,j}$ , u [kW],
- srednja temperatura medijuma hladnog akumulatora energije na početku vremenskog koraka  $i, j$ ,  $t_{RS}^{i,j}$ , u [°C],

pri čemu se punjenje toplog akumulatora odnosi na dovođenje energije medijumu a pražnjenje na odvođenje energije, dok se kod hladnog akumulatora punjenje odnosi na odvođenje, a pražnjenje na dovođenje energije.

Nije neophodno da temperatura medijuma za svaki vremenski korak bude nezavisno promenljiva veličina, već je dovoljno da to bude samo jedna temperatura, npr. na početku posmatranog perioda, a da ostale budu zavisne od nje, kao i od brzine punjenja i pražnjenja i gubitaka/dobitaka energije. Ipak, primećeno je da se problemi u kojima se sve temperature tretiraju kao nezavisno promenljive veličine u ovom slučaju brže rešavaju. Takvi problemi su veći, ali razudjeniji (odgovarajuće matrice imaju više 0-elemenata).

Pored toga, postoje i binarne nezavisno promenljive veličine  $\delta_{TS}^i$  i  $\delta_{RS}^i$ , kojima se definiše da li se topli i hladni akumulatori energije koriste tokom posmatranog perioda  $i$ , kao i veličine  $\delta_{TS,I}^{i,j}$ ,  $\delta_{TS,E}^{i,j}$ ,  $\delta_{RS,E}^{i,j}$  i  $\delta_{RS,I}^{i,j}$  kojima se definiše da li je tokom koraka  $i, j$  dozvoljeno punjenje, odnosno pražnjenje. Nulte vrednosti  $\delta_{TS}^i$  odnosno  $\delta_{RS}^i$  odgovaraju ispražnjenim akumulatorima. Među ovim veličinama postoje sledeći odnosi:

$$\delta_{TS}^i \geq \delta_{TS,I}^{i,j}, \quad \delta_{TS}^i \geq \delta_{TS,E}^{i,j}, \quad \text{opciono: } \delta_{TS}^i \leq \delta_{TS,I}^{i,j} + \delta_{TS,E}^{i,j}, \quad \delta_{TS,I}^{i,j} + \delta_{TS,E}^{i,j} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (3.71)$$

$$\delta_{RS}^i \geq \delta_{RS,I}^{i,j}, \quad \delta_{RS}^i \geq \delta_{RS,E}^{i,j}, \quad \text{opciono: } \delta_{RS}^i \leq \delta_{RS,I}^{i,j} + \delta_{RS,E}^{i,j}, \quad \delta_{RS,I}^{i,j} + \delta_{RS,E}^{i,j} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (3.72)$$

Pošto se ovako može javiti previše binarnih nezavisno promenljivih veličina u modelu, moguće je model uprostiti tako što će promenljive  $\delta_{TS}^i$  i  $\delta_{RS}^i$  uvek imati vrednost 1 ili biti ulazne veličine, ili alternativno, tako što će se  $\delta_{TS,I}^{i,j}$  i  $\delta_{TS,E}^{i,j}$  zameniti sa  $\delta_{TS}^i$ , odnosno  $\delta_{RS,I}^{i,j}$  i  $\delta_{RS,E}^{i,j}$  sa  $\delta_{RS}^i$ .

Toplotna energija razmenjena tokom punjenja i pražnjenja toplog i hladnog akumulatora

za svaki vremenski korak  $i, j$ , u [kWh], definiše se kao:

$$Q_{t,TS,I}^{i,j} = \dot{Q}_{t,TS,I}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.73)$$

$$Q_{t,TS,E}^{i,j} = \dot{Q}_{t,TS,E}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.74)$$

$$Q_{r,RS,I}^{i,j} = \dot{Q}_{r,RS,I}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.75)$$

$$Q_{r,RS,E}^{i,j} = \dot{Q}_{r,RS,E}^{i,j} \tau \quad \forall i, j \quad (3.76)$$

Pretpostavljeno je da su brzine punjenja i pražnjenja tokom svakog vremenskog koraka  $i, j$  konstantne nenegativne kontinualne veličine ograničene predefinisanim minimalnim i maksimalnim vrednostima:

$$\delta_{TS,I}^{i,j} \dot{Q}_{t,TS,I,\min}^{i,j} \leq \dot{Q}_{t,TS,I}^{i,j} \leq \delta_{TS,I}^{i,j} \dot{Q}_{t,TS,I,\max}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.77)$$

$$\delta_{TS,E}^{i,j} \dot{Q}_{t,TS,E,\min}^{i,j} \leq \dot{Q}_{t,TS,E}^{i,j} \leq \delta_{TS,E}^{i,j} \dot{Q}_{t,TS,E,\max}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.78)$$

$$\delta_{RS,I}^{i,j} \dot{Q}_{r,RS,I,\min}^{i,j} \leq \dot{Q}_{r,RS,I}^{i,j} \leq \delta_{RS,I}^{i,j} \dot{Q}_{r,RS,I,\max}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.79)$$

$$\delta_{RS,E}^{i,j} \dot{Q}_{r,RS,E,\min}^{i,j} \leq \dot{Q}_{r,RS,E}^{i,j} \leq \delta_{RS,E}^{i,j} \dot{Q}_{r,RS,E,\max}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.80)$$

Temperature medijuma se menjaju tokom vremenskih koraka u zavisnosti od dovedene i odvedene energije. Kod toplih akumulatora temperatura medijuma je uvek viša, a kod hladnih niža od temperature okoline, ukoliko se akumulator koristi. Ove temperature su definisane kao semi-kontinualne nezavisno promenljive veličine čije su vrednosti unutar zadatih opsega kada se akumulator koristi ( $\delta_{TS}^i = 1$  tj.  $\delta_{RS}^i = 1$ ) i jednake temperaturi okoline kada se ne koristi ( $\delta_{TS}^i = 0$  tj.  $\delta_{RS}^i = 0$ ).

Predviđena su po dva zadata opsega temperatura za svaki akumulator. Jedan je radni opseg definisan minimalnom i maksimalnom radnom temperaturom,  $t_{TS,\min}^{i,j}$  i  $t_{TS,\max}^{i,j}$ , odnosno  $t_{RS,\min}^{i,j}$  i  $t_{RS,\max}^{i,j}$ , koje su ulazne veličine i zavise pre svega od temperaturnih režima grejanja i hlađenja. Ovde je pretpostavljeno da sistem grejanja funkcioniše u režimu 90 °C/70 °C, a sistem hlađenja u režimu 5 °C/12 °C, pa se  $t_{TS}^{i,j}$  kreće u granicama 70–90 °C, a  $t_{RS}^{i,j}$  u opsegu 5–12 °C, ukoliko se akumulatori koriste. Drugi, širi opseg,  $t_{TS,lb} - t_{TS,ub}$ , odnosno  $t_{RS,lb} - t_{RS,ub}$ , je definisan dozvoljenim temperaturama medijuma i uslovljen ograničenjima kao što je promena faza i sl. U ovom slučaju, taj opseg je 4–98 °C za oba akumulatora. Svakako mora da bude  $t_{TS,lb} < t_{TS,\min}^{i,j}$ ,  $t_{TS,lb} < t_{RS,\min}^{i,j}$ ,  $t_{TS,ub} > t_{TS,\max}^{i,j}$  i  $t_{TS,ub} > t_{RS,\max}^{i,j}$ , za svaki vremenski korak  $i, j$ .

Treba voditi računa da izabrane vrednosti  $t_{RS,lb}$  i  $t_{RS,ub}$  ne uzrokuju neizvodljivost

rešenja problema optimizacije kada se medijum hladi ili zagreva usled toplotnih gubitaka/dobitaka.

Pored toga, nije dozvoljeno odvoditi energiju iz akumulatora ako je temperatura medijuma manja od minimalno dozvoljene radne temperature, niti je dovoditi ako je temperatura medijuma veća od maksimalne radne temeperature, pa je:

$$t_{TS}^{i,j} \geq t_{0,TS}^{i,j} + \delta_{TS}^i (t_{TS,lb} - t_{0,TS}^{i,j}) + \delta_{TS,E}^{i,j} (t_{TS,min}^{i,j} - t_{TS,lb}) \quad \forall i, j \quad (3.81)$$

$$t_{TS}^{i,j} \leq t_{0,TS}^{i,j} + \delta_{TS}^i (t_{TS,ub} - t_{0,TS}^{i,j}) + \delta_{TS,I}^{i,j} (t_{TS,max}^{i,j} - t_{TS,ub}) \quad \forall i, j \quad (3.82)$$

$$t_{TS}^{i,j+1} \geq t_{0,TS}^{i,j+1} + \delta_{TS}^i (t_{TS,lb} - t_{0,TS}^{i,j+1}) + \delta_{TS,E}^{i,j} (t_{TS,min}^{i,j} - t_{TS,lb}) \quad \forall i, j \quad (3.83)$$

$$t_{TS}^{i,j+1} \leq t_{0,TS}^{i,j+1} + \delta_{TS}^i (t_{TS,ub} - t_{0,TS}^{i,j+1}) + \delta_{TS,I}^{i,j} (t_{TS,max}^{i,j} - t_{TS,ub}) \quad \forall i, j \quad (3.84)$$

$$t_{RS}^{i,j} \geq t_{0,RS}^{i,j} + \delta_{RS}^i (t_{RS,lb} - t_{0,RS}^{i,j}) + \delta_{RS,E}^{i,j} (t_{RS,min}^{i,j} - t_{RS,lb}) \quad \forall i, j \quad (3.85)$$

$$t_{RS}^{i,j} \leq t_{0,RS}^{i,j} + \delta_{RS}^i (t_{RS,ub} - t_{0,RS}^{i,j}) + \delta_{RS,I}^{i,j} (t_{RS,max}^{i,j} - t_{RS,ub}) \quad \forall i, j \quad (3.86)$$

$$t_{RS}^{i,j+1} \geq t_{0,RS}^{i,j+1} + \delta_{RS}^i (t_{RS,lb} - t_{0,RS}^{i,j+1}) + \delta_{RS,E}^{i,j} (t_{RS,min}^{i,j} - t_{RS,lb}) \quad \forall i, j \quad (3.87)$$

$$t_{RS}^{i,j+1} \leq t_{0,RS}^{i,j+1} + \delta_{RS}^i (t_{RS,ub} - t_{0,RS}^{i,j+1}) + \delta_{RS,I}^{i,j} (t_{RS,max}^{i,j} - t_{RS,ub}) \quad \forall i, j \quad (3.88)$$

Temperature medijuma nisu od značaja tokom perioda u kojima se akumulatori ne koriste, pa njihova matematička interpretacija nema poseban fizički smisao. Pretpostavka da je tada temperatura medijuma jednaka temperaturi okoline, koja je ugrađena u nejednačine (3.81)–(3.88), je uvedena jer je matematički pogodna.

Deo modela su i ograničenja izvedena iz bilansa energije akumulatora za svaki vremenski korak  $i, j$ . Prema bilansu energije, promena temperature medijuma u akumulatoru zavisi od dovedene i odvedene energije, kao i od gubitaka ili dobitaka energije kroz omotač akumulatora, proporcionalnih razlici temperatura medijuma i okoline. Ako se energija koju akumulatori predaju ili prime od ostatka postrojenja, uključujući i gubitke usled punjenja i pražnjenja, izrazi kao:

$$\dot{Q}_{t,TS,N}^{i,j} = a_{t,TS,I}^{i,j} \dot{Q}_{t,TS,I}^{i,j} + b_{t,TS,I}^{i,j} \delta_{TS,I}^{i,j} - a_{t,TS,E}^{i,j} \dot{Q}_{t,TS,E}^{i,j} - b_{t,TS,E}^{i,j} \delta_{TS,E}^{i,j} + b_{t,TS}^{i,j} \delta_{TS}^i \quad \forall i, j \quad (3.89)$$

$$\dot{Q}_{r,RS,N}^{i,j} = a_{r,RS,I}^{i,j} \dot{Q}_{r,RS,I}^{i,j} + b_{r,RS,I}^{i,j} \delta_{RS,I}^{i,j} - a_{r,RS,E}^{i,j} \dot{Q}_{r,RS,E}^{i,j} - b_{r,RS,E}^{i,j} \delta_{RS,E}^{i,j} + b_{r,RS}^{i,j} \delta_{RS}^i \quad \forall i, j \quad (3.90)$$

tada se bilans energije akumulatora može definisati jednačinama (3.91) i (3.92):

$$m_{TS} c_{TS} \frac{dt_{TS}}{d\tau} = \dot{Q}_{t,TS,N}^{i,j} - U_{TS} A_{TS} (t_{TS} - t_0) \quad \forall i, j \quad (3.91)$$

$$m_{RS} c_{RS} \frac{dt_{RS}}{d\tau} = \dot{Q}_{t,RS,N}^{i,j} - U_{RS} A_{RS} (t_{RS} - t_0) \quad \forall i, j \quad (3.92)$$

gde su  $m_{TS}$  i  $m_{RS}$  mase medijuma toplog i hladnog akumulatora, izražene u [kg],  $c_{TS}$  i  $c_{RS}$  specifični toplotni kapaciteti medijuma, izraženi u [kWh kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>],  $U_{TS}$  i  $U_{RS}$  koeficijenti prolaza toplote omotača akumulatora, koji se ovde smaraju konstantnim, ali bi mogli i da budu različiti u raznim vremenskim koracima, zavisno od stanja okolnog vazduha ili drugih ulaznih parametara, u [kW m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>],  $A_{TS}$  i  $A_{RS}$  površine omotača toplog i hladnog akumulatora, u [m<sup>2</sup>], a  $t_0$  temperatura okoline, u [°C]. Koeficijentima linearne regresije se mogu uzeti u obzir gubici, odnosno dobici energije pri punjenju i pražnjenju akumulatora.

Pod pretpostavkom da su medijumi za skladištenje energije nekompresibilni i da njihove mase i specifični toplotni kapaciteti, kao i koeficijenti prolaza toplote omotača ne zavise od temperatura medijuma, integraljenjem jednačina (3.91) i (3.92) po vremenu, od početka do kraja posmatranog vremenskog koraka, dobijaju se sledeća ograničenja za svaki vremenski korak  $i, j$ :

$$t_{TS}^{i,j+1} = t_{TS}^{i,j} \exp\left(-\frac{U_{TS} A_{TS} \tau}{m_{TS} c_{TS}}\right) + \left(\frac{\dot{Q}_{t,TS,N}^{i,j}}{U_{TS} A_{TS}} + t_{0,TS}^{i,j}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{U_{TS} A_{TS} \tau}{m_{TS} c_{TS}}\right)\right) + (1 - \delta_{TS}^i) (t_{0,TS}^{i,j+1} - t_{0,TS}^{i,j}) \quad \forall i, j \quad (3.93)$$

$$t_{RS}^{i,j+1} = t_{RS}^{i,j} \exp\left(-\frac{U_{RS} A_{RS} \tau}{m_{RS} c_{RS}}\right) + \left(\frac{\dot{Q}_{t,RS,N}^{i,j}}{U_{RS} A_{RS}} + t_{0,RS}^{i,j}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{U_{RS} A_{RS} \tau}{m_{RS} c_{RS}}\right)\right) + (1 - \delta_{RS}^i) (t_{0,RS}^{i,j+1} - t_{0,RS}^{i,j}) \quad \forall i, j \quad (3.94)$$

Poslednji članovi sa desne strane jednačina (3.93) i (3.94) nisu izvedeni iz bilansa energije, tj. nisu dobijeni integraljenjem jednačina (3.91) i (3.92), već su dodati kako bi se veštački postigla saglasnost sa ograničenjima (3.81)–(3.88) kada je  $\delta_{TS}^i = 0$ , odnosno  $\delta_{RS}^i = 0$ . Tada vrednosti temperatura medijuma i sami bilansi energije nisu od značaja. Ove temperature i bilansi su značajni samo kada je  $\delta_{TS}^i = 1$ , odnosno  $\delta_{RS}^i = 1$ , a onda su pomenuti članovi jednaki 0. Ovakav pristup je pogodan jer je model za akumulator energije veoma jednostavan kada je binarna nezavisno promenljiva veličina jednaka 0.

Ukoliko se pretpostavi da će akumulator energije biti korišćen ili da neće biti korišćen u kontinuitetu tokom dužeg vremenskog perioda, npr. cele sezone grejanja ili hlađenja, mogu se uvesti ograničenja kojima se izjednačavaju binarne nezavisno promenljive

veliĉine za više tipičnih perioda, npr:

$$\delta_{TS}^{i_1} = \delta_{TS}^{i_2} = \dots = \delta_{TS}^{i_n} \quad (3.95)$$

$$\delta_{RS}^{i_1} = \delta_{RS}^{i_2} = \dots = \delta_{RS}^{i_n} \quad (3.96)$$

Koliĉine toplotne energije razmenjene sa toplim i hladnim akumulatorom u vremenskom koraku  $i, j$ , u [kWh], iznose:

$$Q_{t,TS}^{i,j} = Q_{t,TS,E}^{i,j} - Q_{t,TS,I}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.97)$$

$$Q_{r,RS}^{i,j} = Q_{r,RS,I}^{i,j} - Q_{r,RS,E}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.98)$$

dok su koliĉine elektriĉne energije potrebne za rad toplog i hladnog akumulatora, u [kWh]:

$$W_{x,TS}^{i,j} = \left( a_{x,TS,I}^{i,j} \dot{Q}_{t,TS,I}^{i,j} + b_{x,TS,I}^{i,j} \delta_{TS,I}^{i,j} + a_{x,TS,E}^{i,j} \dot{Q}_{t,TS,E}^{i,j} + b_{x,TS,E}^{i,j} \delta_{TS,E}^{i,j} + b_{x,TS}^{i,j} \delta_{TS}^i \right) \tau \quad \forall i, j \quad (3.99)$$

$$W_{x,RS}^{i,j} = \left( a_{x,RS,I}^{i,j} \dot{Q}_{r,RS,I}^{i,j} + b_{x,RS,I}^{i,j} \delta_{RS,I}^{i,j} + a_{x,RS,E}^{i,j} \dot{Q}_{r,RS,E}^{i,j} + b_{x,RS,E}^{i,j} \delta_{RS,E}^{i,j} + b_{x,RS}^{i,j} \delta_{RS}^i \right) \tau \quad \forall i, j \quad (3.100)$$

Pretpostavljeno je da razmatrani sistem za snabdevanje energijom ima jedan topao i eventualno jedan hladan akumulator energije sa vodom kao medijumom.

### 3.3.2. Sinteza matematiĉkih modela komponenata

Pored ograniĉenja, tj. jednaĉina i nejednaĉina, koje se odnose na pojedinaĉne komponente, postoje i ograniĉenja koja se odnose na više komponenata istovremeno ili na ceo sistem. U ovakva ograniĉenja bi se mogle uvrstiti nejednaĉine (3.50), (3.51) i (3.69), ali i ograniĉenja utrošene koliĉine goriva tokom godine, posebno ukoliko je reĉ o biomasi ili otpadu [126], kao i jednaĉine i nejednaĉine koje se odnose na:

- zadovoljenje potreba korisnika,
- ograniĉenje vrednosti finansijskih indikatora,
- ograniĉenje vrednosti indikatora energetske efikasnosti,
- ograniĉenje vrednosti indikatora uticaja na životnu sredinu,
- ograniĉenja definisana zakonskom regulativom i dr.

### 3.3.2.1. Zadovoljenje potreba korisnika

Primarna funkcija razmatranog postrojenja za snabdevanje energijom je potpuno zadovoljenje potražnje korisnika za električnom energijom, grejanjem i hlađenjem, pa u najvažnija ograničenja spadaju upravo ona kojima se definiše da ove potrebe moraju biti zadovoljene u svakom vremenskom koraku  $i, j$ :

$$W_{e,D}^{i,j} = W_{e,Grid}^{i,j} + \sum_{k=1}^{n_{CG}} W_{e,CG,N,k}^{i,j} - \sum_{k=1}^{n_{CH}} W_{x,CH,k}^{i,j} - W_{x,TS}^{i,j} - \sum_{k=1}^{n_{AR}} W_{x,AR,k}^{i,j} - \sum_{k=1}^{n_{CR}} W_{x,CR,k}^{i,j} - \sum_{k=1}^{n_{CT}} W_{x,CT,k}^{i,j} - W_{x,RS}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.101)$$

$$Q_{t,D}^{i,j} = \sum_{k=1}^{n_{CG}} Q_{t,CG,HT,k}^{i,j} + \sum_{k=1}^{n_{CH}} Q_{t,CH,k}^{i,j} - \sum_{k=1}^{n_{AR}} Q_{t,AR,k}^{i,j} + Q_{t,TS}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.102)$$

$$Q_{r,D}^{i,j} = \sum_{k=1}^{n_{AR}} Q_{r,AR,k}^{i,j} + \sum_{k=1}^{n_{CR}} Q_{r,CR,k}^{i,j} + Q_{r,RS}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.103)$$

Jednačinom (3.101) se uvodi ograničenje da u svakom vremenskom koraku potražnja električne energije od strane korisnika i ukupna potrošnja komponentata sistema moraju da budu zadovoljene iz komponentata za kogeneraciju ili preuzimanjem iz mreže za distribuciju, dok se višak proizvedene električne energije može predati mreži. Jednačinom (3.102) se definiše da celokupna potreba korisnika za grejanjem i potrošnja toplotne energije apsorpcionih rashladnih mašina moraju biti zadovoljene toplotnom energijom dobijenom u posmatranom vremenskom koraku kogeneracijom ili u kotlovima, ili energijom ranije uskladištenom u toplom akumulatoru. Višak proizvedene toplotne energije se može skladištiti ukoliko akumulator nije pun. Slično, jednačinom (3.103) se definiše da celokupna potreba korisnika za hlađenjem mora biti obezbeđena iz apsorpcionih i kompresorskih rashladnih mašina i hladnog akumulatora, dok se dobijeni višak takođe može skladištiti.

Ukoliko se, pored sistema za snabdevanje energijom, vrši i optimizacija mera za uštedu energije na strani korisnika, potrebe korisnika  $W_{e,D}^{i,j}$ ,  $Q_{t,D}^{i,j}$  i  $Q_{r,D}^{i,j}$  u svakom vremenskom koraku  $i, j$  zavise od izbora pomenutih mera. U suprotnom se ne menjaju. U svakom slučaju, ove veličine su ulazni parametri za problem optimizacije.

### 3.3.2.2. Finansijski i ekonomski indikatori

Varijabilni troškovi rada sistema za snabdevanje energijom zavise od radnog režima i odnose se na varijabilne troškove rada i održavanja i kupljene i prodane energente. Za svaki vremenski korak  $i, j$  ovi troškovi, izraženi u [EUR], su jednaki:

$$Z_V^{i,j} = \sum_k Z_{OM,V,k}^{i,j} + \zeta_{e,I}^{i,j} W_{e,I,G}^{i,j} - \zeta_{e,E}^{i,j} W_{e,E,N}^{i,j} + \zeta_{f,CG}^{i,j} \sum_{k=1}^{n_{CG}} Q_{f,CG,k}^{i,j} + \zeta_{f,CH}^{i,j} \sum_{k=1}^{n_{CH}} Q_{f,CH,k}^{i,j} \quad \forall i, j \quad (3.104)$$

gde su  $\zeta_{e,I}^{i,j}$  i  $\zeta_{e,E}^{i,j}$  cene preuzete i isporučene električne energije, u [EUR kWh<sup>-1</sup>], a  $\zeta_{f,CG}^{i,j}$  i  $\zeta_{f,CH}^{i,j}$  cene goriva za kogenerativne jedinice i kotlove, u [EUR kWh<sup>-1</sup>], izražene na osnovu donje toplotne moći. Ukupni varijabilni troškovi, u zavisnosti od tarifnog sistema mogu obuhvatiti i troškove maksimalne angažovane električne snage, pa su ukupni varijabilni troškovi za sve posmatrane obračunske periode  $u$ :

$$Z_V = \sum_i \sum_j Z_V^{i,j} + \sum_u \zeta_{e,I,Cap}^u \dot{W}_{e,I,Cap}^u \quad (3.105)$$

gde je  $\zeta_{e,I,Cap}^u$  cena angažovane električne snage, u [EUR kW<sup>-1</sup>].

Ukupni troškovi, takođe izraženi u [EUR], pored varijabilnih, obuhvataju i nivelisane troškove investicije, kao i konstantne troškove rada i održavanja za posmatrani period, najčešće godinu dana:

$$Z_T = CRF Z_{Inv} + Z_{OM,T} + Z_e + Z_f = CRF Z_{Inv} + \sum_k Z_{OM,C,k} + Z_V \quad (3.106)$$

gde je  $Z_{Inv}$  ukupna investicija,  $Z_{OM,T}$  ukupni troškovi rada i održavanja, a  $Z_e$  i  $Z_f$  ukupni novčani tokovi koji se odnose na električnu energiju i goriva, izraženi u [EUR], dok je CRF faktor povraćaja kapitala koji se određuje jednačinom (3.107) u zavisnosti od diskontne ili kamatne stope,  $r$ , i ekonomskog veka projekta ili životnog veka komponenata,  $T$ :

$$CRF = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-T}} \quad (3.107)$$

Visina investicije i ukupni troškovi rada i održavanja ne zavise od radnih režima postrojenja, već samo od strukturnih i projektnih nezavisno promenljivih veličina, pre svega od izbora tipova, modela i broja komponenata. Osim toga, na investiciju utiču i mere uštede energije na strani korisnika, troškovi zemljišta, projektovanja, administrativni troškovi (dozvole, takse i sl), sporedne komponente (cevovodi, pumpe, ventili, sabirnici, razdelnici itd), sistemi za nadzor i dr.

Pozitivne vrednosti varijabilnih ili ukupnih troškova se dobijaju u slučajevima kada su rashodi veći od prihoda, a negativne u suprotnom.

U zavisnosti od slučaja, prikazani parametri se mogu definisati i na nešto drugačiji način (npr. ukoliko se toplotna energija takođe prodaje), ali je pristup optimizaciji nepromenjen.

### 3.3.2.3. Primarna energija

Potrošnja primarne energije tokom svakog vremenskog koraka  $i, j$ , izražena u [kWh], određuje se jednačinom (3.108):

$$E_P^{i,j} = \varphi_{e,l}^{i,j} W_{e,l,G}^{i,j} - \varphi_{e,E}^{i,j} W_{e,E,N}^{i,j} + \varphi_f \left( \sum_{k=1}^{n_{CG}} Q_{f,CG,k}^{i,j} + \sum_{k=1}^{n_{CH}} Q_{f,CH,k}^{i,j} \right) \quad \forall i, j \quad (3.108)$$

gde su  $\varphi_{e,l}^{i,j}$ ,  $\varphi_{e,E}^{i,j}$  i  $\varphi_f$  faktori konverzije električne energije i energije goriva, izražene na osnovu donje toplotne moći, u primarnu energiju, u [kWh kWh<sup>-1</sup>]. Pozitivne vrednosti potrošnje primarne energije se dobijaju kada je uticaj preuzete električne energije i potrošnje goriva veći od uticaja isporučene električne energije, a negativne u suprotnom.

### 3.3.2.4. Emisija gasova sa efektom staklene bašte

Emisija gasova sa efektom staklene bašte tokom svakog vremenskog koraka  $i, j$ , izražena u [kg CO<sub>2</sub>e], određuje se jednačinom (3.109):

$$m_{GHG}^{i,j} = \psi_{e,l}^{i,j} W_{e,l,G}^{i,j} - \psi_{e,E}^{i,j} W_{e,E,N}^{i,j} + \psi_f \left( \sum_{k=1}^{n_{CG}} Q_{f,CG,k}^{i,j} + \sum_{k=1}^{n_{CH}} Q_{f,CH,k}^{i,j} \right) \quad \forall i, j \quad (3.109)$$

gde su  $\psi_{e,l}^{i,j}$ ,  $\psi_{e,E}^{i,j}$  i  $\psi_f$  faktori konverzije električne energije i energije goriva, izražene na osnovu donje toplotne moći, u emisiju gasova sa efektom staklene bašte, u [kg CO<sub>2</sub>e kWh<sup>-1</sup>]. Pozitivne vrednosti emisije gasova sa efektom staklene bašte se dobijaju kada je uticaj preuzete električne energije i potrošnje goriva veći od uticaja isporučene električne energije, a negativne u suprotnom.

### *3.3.2.5. Zadovoljenje projektnih zahteva*

Posebna vrsta ograničenja su ona koja se odnose samo na strukturu i projektne parametre postrojenja i nisu direktno povezana sa radnim režimima. Ovakva ograničenja se ne razmatraju u postupku optimizacije radnog režima, već samo pri vrednovanju strukturnih i projektnih parametara. Primeri projektnih zahteva, tj. ograničenja su: minimalni dozvoljeni kapacitet komponenata za grejanje, hlađenje ili snabdevanje električnom energijom, sposobnost postrojenja da zadovolji energetske potrebe korisnika tokom projektnih perioda, maksimalna prihvatljiva visina investicije itd.

Od posebnog značaja je mogućnost zadovoljenja potreba korisnika tokom projektnih perioda i to je jedino pomenuto ograničenje koje bi uvek trebalo ispitati u procesu optimizacije strukturnih i projektnih parametara. Iako je to moguće učiniti na više načina, ovde se predlaže da se zadovoljenje ovog uslova utvrdi tako što će se za svaki projektni period posebno odrediti radni režim izloženim postupkom optimizacije. Ukoliko posmatrani projektni period nije istovremeno i tipični period, tada ne postoji potreba da se precizno utvrdi optimalni radni režim, već samo da li postoji bar jedan skup radnih parametara koji zadovoljava sva ograničenja, odnosno bar jedno izvodljivo rešenje problema optimizacije radnog režima. Prema tome, tada je dozvoljeno prekinuti proceduru određivanja optimalnog radnog režima odmah nakon pronalaženja prvog izvodljivog rešenja ili, alternativno, u slučaju korišćenja metode grananja i ograničavanja ili grananja i sečenja, definisati relativno veliku dozvoljenu grešku, tj. razliku između vrednosti funkcije cilja trenutnog najboljeg izvodljivog rešenja i procenjene potencijalne najbolje vrednosti funkcije cilja u tom trenutku.

Ova ograničenja mogu biti definisana kao tvrda, tj. ona koja moraju biti zadovoljena ili meka, tj. ona koja ne moraju biti zadovoljena u potpunosti. U slučaju da neka kombinacija strukturnih i projektnih parametara ne zadovolji neko tvrdo ograničenje, ta kombinacija se smatra neizvodljivom. Ukoliko nije zadovoljeno neko meko ograničenje, moguće je dodati tzv. „kaznenu“ vrednost funkciji cilja, relaksirati ograničenje i ponovo proveriti da li može biti zadovoljeno itd. Za razmatranje mekih ograničenja nekada je pogodno upotrebiti tehnike fazi programiranja. Redosled razmatranja ovih ograničenja zavisi od konkretnog problema i definiše se u skladu sa logikom izbora opreme i težnjom da problem bude rešen u što kraćem vremenskom periodu. Može biti korisno da se najpre razmatraju tvrda ograničenja, posebno ona za koja postoji manja verovatnoća da će biti zadovoljena, tako da ukoliko ona nisu zadovoljena, nema potrebe razmatrati ostala ograničenja. Takođe je logično najpre razmotriti ograničenja za koja će se utrošiti manje vremena, npr. brže će se utvrditi da li je ukupan kapacitet neke grupe komponenata veći od minimalno zahtevanog nego da li se mogu zadovoljiti potrebe korisnika u toku nekog projektnog perioda.

Sa aspekta motivacije za uvođenjem ovakvih ograničenja, ona se mogu podeliti u dve grupe:

- (1) ograničenja koja nisu već obuhvaćena ostalim ograničenjima,
- (2) ograničenja koja bi svakako bila zadovoljena ukoliko se nađe izvodljivo rešenje.

Ograničenja iz prve grupe su obavezna i često će biti aktivna, tj. sama po sebi činiti problem težim za zadovoljenje. Takva su npr. ograničenja vezana za zadovoljenje energetske potreba korisnika u toku projektnih perioda ili u vezi sa maksimalnom dozvoljenom visinom investicije.

Druga grupa ograničenja se uvodi isključivo da bi se, u slučaju da nisu zadovoljena, izbeglo razmatranje ostalih ograničenja koja su zahtevnija sa stanovišta efikasnosti, tj. vremena potrebnog za rešavanje problema. Na primer, ukoliko je maksimalna raspoloživa toplotna energija svih kogenerativnih jedinica, kotlova i punog toplog akumulatora energije manja od toplotnog opterećenja u bilo kom vremenskom koraku (npr. maksimalnog opterećenja), nema potrebe ispitivati projektne, a još manje tipične periode jer je jasno da takvo postrojenje ne može zadovoljiti zahteve korisnika. Slično važi i za zadovoljenje potreba za hlađenjem. Prema tome, ova ograničenja služe samo za brže odbacivanje neizvodljivih rešenja problema optimizacije, tj. za povećanje efikasnosti korišćenog algoritma. Matematički gledano, slična ograničenja su uveli Hooker i dr. [175] i nazvali ih logičkim ograničenjima.

Dakle, ograničenja koja se tiču zadovoljenja projektnih zahteva mogu biti definisana i tretirana na različite načine, zavisno od situacije, što ovaj pristup čini još fleksibilnijim.

### *3.3.2.6. Zakonska ograničenja*

Ograničenja definisana zakonima, podzakonskim ili drugim pravnim ili regulatornim aktima su često prisutna, pre svega u vezi sa podsticajnim merama za kogeneraciju, energetske efikasnost ili korišćenje obnovljivih izvora energije, ali i pravilima koja važe na tržištu električne energije (regulisanom ili liberalizovanom), tržištu toplotne energije i sl. Na primer, u Republici Srbiji je predviđeno da se status povlašćenog proizvođača električne energije [18] i pravo na isporuku električne energije po podsticajnim cenama, definisanim Uredbom [20], može steći između ostalog u slučaju obavljanja energetske delatnosti proizvodnje električne energije u elektrani sa kogeneracijom na prirodni gas ukoliko je ukupni godišnji stepen korisnosti veći od 85 % [19]. Zadovoljenje ovakvog

uslova moglo bi se izraziti nejednačinom:

$$\sum_i \sum_j \sum_{k=1}^{n_{CG}} (W_{e,CG,k}^{i,j} + Q_{t,CG,HT,k}^{i,j} + Q_{t,CG,LT,k}^{i,j}) \geq 0,85 \sum_i \sum_j \sum_{k=1}^{n_{CG}} Q_{f,CG,k}^{i,j} \quad (3.110)$$

ili sličnom, u zavisnosti od precizne definicije ukupnog stepena korisnosti postrojenja za kogeneraciju.

### **3.4. Formulacija problema optimizacije**

Optimizacija energetskeg sistema se može razmatrati na tri nivoa [8, 59, 176]:

- (1) nivou strukture postrojenja,
- (2) nivou projektnih parametara postrojenja,
- (3) nivou radnih parametara postrojenja.

Optimizacija strukture postrojenja služi za izbor komponenata koje će ući u sastav razmatranog sistema i odbacivanje ostalih. Nezavisno promenljive veličine kojima se opisuje struktura su najčešće celobrojne, obično binarne. Projektni parametri predstavljaju tehničke karakteristike komponenata sistema pri nominalnim uslovima (opterećenju, temperaturi okolnog vazduha, nadmorskoj visini i dr) i mogu se prikazati kontinualnim ili diskrenim nezavisno promenljivim veličinama. Kontinualnim veličinama se mogu predstaviti nominalne vrednosti fizičkih veličina koje se odnose na radne fluide (npr. pritisak ili temperatura), dok se diskretnim određuje npr. konkretan model komponente koji se bira. Ovde će se struktura postrojenja i projektni parametri komponenata posmatrati zajedno, a razmatraće se različite kombinacije standardnih komponenata. Radni parametri se, kao što je već rečeno, mogu predstaviti binarnim nezavisno promenljivim veličinama kojima se određuje da li određena komponenta radi u posmatranom vremenskom koraku i kontinualnim veličinama kojima se prikazuju tokovi energije, temperature i sl. za svaki vremenski korak posebno.

Ukoliko se vrši kompletna optimizacija postrojenja, ovi nivoi se ne mogu razmatrati nezavisno [176]. Dakle, potrebno je naći optimalne strukturne, projektne i radne parametre sistema koji će istovremeno zadovoljavati zadata ograničenja. Kriterijumi optimalnosti se predstavljaju jednom ili više funkcija cilja. Ograničenja predstavljaju jednačine i nejednačine veze i mogu biti tvrda, tj. ona koja moraju biti potpuno zadovoljena, odnosno meka, tj. ona koja ne moraju biti u potpunosti zadovoljena.

Prilikom definicije problema optimizacije energetskeg sistema, potrebno je jasno odrediti:

- ulazne parametre, koji mogu zavisiti jedni od drugih, ali se njihove vrednosti određuju pre postupka optimizacije u kome se smatraju konstantama,
- nezavisno promenljive veličine, čije se vrednosti određuju u postupku optimizacije,
- zavisne veličine, koje se izražavaju u funkciji nezavisno promenljivih veličina,
- ograničenja, tj. jednačine i nejednačine veze,
- funkcije cilja kojima se definišu kriterijumi optimizacije,
- izlazne veličine.

Matematički model sistema čine jednačine i nejednačine veze, kao i funkcije zavisnosti zavisnih veličina, funkcija cilja i izlaznih veličina od nezavisno promenljivih veličina.

### **3.4.1. Ulazni parametri**

Ulazni parametri problema optimizacije postrojenja za snabdevanje energijom su:

- podaci o posmatranom vremenskom okviru:
  - razmatrani vremenski period,
  - podaci o tipičnim periodima: da li je vremenski period predstavljen tipičnim periodima  $i$ , ako jeste, koliko stvarnih perioda predstavlja svaki od tipičnih perioda,
  - podaci o projektnim periodima,
  - podaci o obračunskim periodima,
  - trajanje vremenskog koraka,
- stanje okoline u svakom posmatranom vremenskom koraku, tj:
  - temperatura vazduha po suvom termometru,
  - temperatura vazduha po vlažnom termometru,
  - relativna ili apsolutna vlažnost vazduha,
  - vazdušni pritisak,
- potrebe korisnika za električnom energijom, grejanjem i hlađenjem u svakom posmatranom vremenskom koraku,
- cene energenata — prirodnog gasa ili biogasa, preuzete električne energije i isporučene električne energije, za svaki posmatrani vremenski korak,
- faktori za određivanje potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte,
- finansijski podaci za svaku razmatranu komponentu:

- visina investicije prilikom ugradnje komponente,
- troškovi rada i održavanja (bez troškova energenata) na nivou godine ili obračunskog perioda,
- tehnički podaci za svaku komponentu:
  - nominalni kapacitet i drugi relevantni projektni parametri (npr. masa medijuma, površina omotača i koeficijent prolaza toplote za akumulatore),
  - funkcije zavisnosti maksimalnog i minimalnog opterećenja od stanja vazduha i drugih relevantnih parametara,
  - koeficijenti linearne regresije ili karakteristične tačke (u slučaju nelinearnih zavisnosti koje je potrebno aproksimirati linearnim) za modeliranje performansi pri uslovima različitim od projektnih, a pre svega odnosa tokova energije pri parcijalnim opterećenjima, kao i funkcije njihove zavisnosti od stanja vazduha i drugih relevantnih parametara,
  - podaci o efikasnosti, gubicima i sl,
  - podaci u vezi sa puštanjem u rad i zaustavljanjem komponentata, npr. potrošnja energije ili dodatni troškovi rada i održavanja,
  - ostale relevantne tehničke karakteristike,
- prethodno usvojeni, tj. pretpostavljeni projektni i radni parametri (npr. temperaturni režimi grejanja i hlađenja),
- nadstruktura postrojenja, tj. informacije o tome koji se modeli komponenata razmatraju i kakva struktura postrojenja dolazi u obzir,
- ekonomske veličine, kao što je stopa inflacije, stopa porasta cene energenata itd.

### **3.4.2. Nezavisno promenljive veličine**

Nezavisno promenljive veličine strukture postrojenja i projektnih parametara komponenata su diskretne, a nekad i celobrojne ili binarne. Njima se definiše da li neke komponente ulaze u sastav postrojenja ili ne, broj komponenata određenog tipa ili modela ili izbor jednog od nekoliko ponuđenih modela neke komponente. Takođe se mogu koristiti diskretne nezavisno promenljive veličine kojima se vrši izbor paketa mera uštede energije na strani potrošača. Zbog fleksibilnosti pristupa optimizaciji strukturnih i projektnih parametara, ove veličine se mogu defnisati na mnogo različitih načina.

Izbor vrednosti ovih veličina utiče na visinu investicije,  $Z_{Inv}$ . Izbor komponenata postrojenja (tipova, modela i broja) utiče još i na ukupne konstantne troškove rada i održavanja, a izbor mera uštede energije na strani potrošača na potražnju energije od

strane korisnika, tj. svakom od ponuđenih paketa odgovaraju posebne, predefinisane vrednosti potrebe za električnom energijom, grejanjem i hlađenjem,  $W_{e,D}^{i,j}$ ,  $Q_{t,D}^{i,j}$  i  $Q_{r,D}^{i,j}$  za svaki vremenski korak  $i, j$ . Struktura i projektni parametri sistema svakako utiču na izbor optimalnih radnih parametara.

Osnovne nezavisno promenljive veličine za problem optimizacije radnog režima postrojenja za snabdevanje energijom rezimirane su u tabeli 3.1. Pored njih, matematičkom modelu mogu biti dodate i druge nezavisno promenljive veličine. Ukoliko je potrebno problem definisati tako da može biti rešen mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem, potrebno je za svaku binarnu nezavisno promenljivu veličinu  $\delta_k^{i,j}$  dodati nove pomoćne nezavisno promenljive veličine:  $\sigma_{k,1}^{i,j}, \sigma_{k,2}^{i,j}, \dots, \sigma_{k,n_\sigma}^{i,j}$  i  $\zeta_{1,k}^{i,j}$ . Pomoćne nezavisno promenljive veličine je takođe potrebno dodati i u slučaju aprksimacije nelinearnih funkcija linearnim.

### 3.4.3. Zavisne veličine

Zavisne veličine se mogu izraziti u funkciji jedne ili više nezavisno promenljivih veličina. One takođe zavise i od ulaznih parametara, pre svega od tehničkih karakteristika komponenata, stanja okolnog vazduha itd.

U pitanju su pomoćne veličine koje mogu biti eksplicitno definisane u problemu optimizacije, ali to najčešće nije dobra praksa jer na taj način problem postaje obimniji: potrebno je zavisnu veličinu definisati kao novu nezavisno promenljivu veličinu i dodati novo ograničenje kojim se izražava njena zavisnost od ostalih nezavisno promenljivih veličina. Znatno je bolje rešenje ove veličine predstaviti u problemu optimizacije kao matematičke izraze, tj. funkcije vektora nezavisno promenljivih veličina, tako da njihovo uvđenje ne otežava dodatno računarski intenzivan proces rešavanja problema optimizacije radnog režima.

Nije neophodno da ove veličine budu eksplicitno definisane, ali se to čini da bi model bio jasniji, lakši za razumevanje, jednostavniji i manje podložan greškama tokom softverske implementacije.

Najvažnije zavisne veličine za pojedinačne komponente rezimirane su u tabelama 3.2–3.4, gde su prikazane i osnovne nezavisno promenljive veličine od kojih zavise tj. koje povezuju. Najvažnije zavisne veličine koje povezuju više komponenata i njihove nezavisno promenljive veličine prikazane su u tabeli 3.5.

**Tabela 3.1.** Osnovne nezavisno promenljive veličine problema optimizacije radnog režima

K.	Oznaka	Tip	Jedinica	Donja granica	Gornja granica	
CG	$\delta_{CG,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	0-1	–	0	1
	$\dot{W}_{e,CG,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	$\delta_{CG,k}^{i,j} \dot{W}_{e,CG,k,\min}^{i,j}$	$\delta_{CG,k}^{i,j} \dot{W}_{e,CG,k,\max}^{i,j}$
	$\dot{Q}_{t,CG,XG,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	0	$Q_{t,CG,XG,k}^{i,j}/\tau$
	$\dot{Q}_{0,CG,HT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	0	$Q_{t,CG,HT,\max,k}^{i,j}/\tau$
	$\dot{Q}_{0,CG,LT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	0	$Q_{t,CG,LT,\max,k}^{i,j}/\tau$
ET	$\delta_{ET,I}^{i,j}$	$\forall i, j$	0-1	–	0	1; $1 - \delta_{ET,E}^{i,j}$ (opciono)
	$\delta_{ET,E}^{i,j}$	$\forall i, j$	0-1	–	0	1;
	$\dot{W}_{e,I,N}^{i,j}$	$\forall i, j$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	0	$\delta_{ET,I}^{i,j} \dot{W}_{e,I,N,\max}^{i,j}$
	$\dot{W}_{e,E,N}^{i,j}$	$\forall i, j$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	0	$\delta_{ET,E}^{i,j} \dot{W}_{e,E,N,\max}^{i,j}$
	$\dot{W}_{e,I,Cap}^u$	$\forall u$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	$\max_{i,j} \dot{W}_{e,I,G}^{i,j}/\tau, \forall i, j \in u$	–
CH	$\delta_{CH,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	0-1	–	0	1
	$\dot{Q}_{t,CH,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	$\delta_{CH,k}^{i,j} \dot{Q}_{t,CH,k,\min}^{i,j}$	$\delta_{CH,k}^{i,j} \dot{Q}_{t,CH,k,\max}^{i,j}$
AR	$\delta_{AR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	0-1	–	0	1
	$\dot{Q}_{r,AR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	$\delta_{AR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,AR,k,\min}^{i,j}$	$\delta_{AR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,AR,k,\max}^{i,j}$
CR	$\delta_{CR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	0-1	–	0	1
	$\dot{Q}_{r,CR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	$\delta_{CR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,CR,k,\min}^{i,j}$	$\delta_{CR,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,CR,k,\max}^{i,j}$
CT	$\delta_{CT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	0-1	–	0	1
	$\dot{Q}_{r,CT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	0	$\delta_{CT,k}^{i,j} \dot{Q}_{r,CT,k,\max}^{i,j}$
TS	$\delta_{TS}^i$	$\forall i$	0-1	–	0	1; $\delta_{TS,I}^{i,j} + \delta_{TS,E}^{i,j}$ (opciono)
	$\delta_{TS,I}^{i,j}$	$\forall i, j$	0-1	–	0	$\delta_{TS}^i$ ; $1 - \delta_{TS,E}^{i,j}$ (opciono)
	$\delta_{TS,E}^{i,j}$	$\forall i, j$	0-1	–	0	$\delta_{TS}^i$
	$\dot{Q}_{t,TS,I}^{i,j}$	$\forall i, j$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	$\delta_{TS,I}^{i,j} \dot{Q}_{t,TS,I,\min}^{i,j}$	$\delta_{TS,I}^{i,j} \dot{Q}_{t,TS,I,\max}^{i,j}$
	$\dot{Q}_{t,TS,E}^{i,j}$	$\forall i, j$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	$\delta_{TS,E}^{i,j} \dot{Q}_{t,TS,E,\min}^{i,j}$	$\delta_{TS,E}^{i,j} \dot{Q}_{t,TS,E,\max}^{i,j}$
	$t_{TS}^{i,j}$	$\forall i, j$	$\mathbb{R}$	[°C]	$t_{0,TS}^{i,j}; t_{TS,lb}; t_{TS,\min}^{i,j-1}; t_{TS,\min}^{i,j}$	$t_{0,TS}^{i,j}; t_{TS,ub}; t_{TS,\max}^{i,j-1}; t_{TS,\max}^{i,j}$
RS	$\delta_{RS}^i$	$\forall i$	0-1	–	0	1; $\delta_{RS,I}^{i,j} + \delta_{RS,E}^{i,j}$ (opciono)
	$\delta_{RS,I}^{i,j}$	$\forall i, j$	0-1	–	0	$\delta_{RS}^i$ ; $1 - \delta_{RS,E}^{i,j}$ (opciono)
	$\delta_{RS,E}^{i,j}$	$\forall i, j$	0-1	–	0	$\delta_{RS}^i$
	$\dot{Q}_{r,RS,I}^{i,j}$	$\forall i, j$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	$\delta_{RS,I}^{i,j} \dot{Q}_{r,RS,I,\min}^{i,j}$	$\delta_{RS,I}^{i,j} \dot{Q}_{r,RS,I,\max}^{i,j}$
	$\dot{Q}_{r,RS,E}^{i,j}$	$\forall i, j$	$\mathbb{R}_0^+$	[kW]	$\delta_{RS,E}^{i,j} \dot{Q}_{r,RS,E,\min}^{i,j}$	$\delta_{RS,E}^{i,j} \dot{Q}_{r,RS,E,\max}^{i,j}$
	$t_{RS}^{i,j}$	$\forall i, j$	$\mathbb{R}$	[°C]	$t_{0,RS}; t_{RS,lb}; t_{RS,\min}^{i,j-1}; t_{RS,\min}^{i,j}$	$t_{0,RS}; t_{RS,ub}; t_{RS,\max}^{i,j-1}; t_{RS,\max}^{i,j}$

**Tabela 3.2.** Najvažnije zavisne veličine za jedinice za kogeneraciju, transformatore električne energije i kotlove

K.	Oznaka	Jedinica	Povezane veličine	Jednačina
CG	$W_{e,CG,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$W_{e,CG,k}^{i,j}$ (3.27)
	$Q_{t,CG,XG,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$Q_{t,CG,XG,k}^{i,j}$ (3.28)
	$Q_{0,CG,HT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$Q_{0,CG,HT,k}^{i,j}$ (3.29)
	$Q_{0,CG,LT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$Q_{0,CG,LT,k}^{i,j}$ (3.30)
	$Q_{t,CG,XGT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$W_{e,CG,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j}$ (3.32a)
	$Q_{t,CG,JWC,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$W_{e,CG,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j}$ (3.32b)
	$Q_{t,CG,LC1,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$W_{e,CG,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j}$ (3.32c)
	$Q_{t,CG,TC1,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$W_{e,CG,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j}$ (3.32d)
	$Q_{t,CG,LC2,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$W_{e,CG,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j}$ (3.32e)
	$Q_{t,CG,TC2,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$W_{e,CG,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j}$ (3.32f)
	$Q_{t,CG,HT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$W_{e,CG,k}^{i,j}, Q_{t,CG,XG,k}^{i,j}, Q_{0,CG,HT,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j}$ (3.33)
	$Q_{t,CG,LT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$W_{e,CG,k}^{i,j}, Q_{0,CG,LT,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j}$ (3.34) ili (3.38)
	$Q_{f,CG,k}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$W_{e,CG,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j-1}, \delta_{CG,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{CG,k}^{i,j-n_\sigma}, \delta_{CG,k}^{i,j+1}$ (3.39)
	$Q_{\sigma,f,CG,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{CG,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j-1}, \delta_{CG,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{CG,k}^{i,j-n_\sigma}$ (3.13)
	$Q_{\zeta,f,CG,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{CG,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j+1}$ (3.14)
	$W_{x,CG,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$W_{e,CG,k}^{i,j}, Q_{0,CG,HT,k}^{i,j}, Q_{0,CG,LT,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j}$ (3.40)
	$W_{e,CG,N,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$W_{e,CG,k}^{i,j}, Q_{0,CG,HT,k}^{i,j}, Q_{0,CG,LT,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j}$ (3.41)
$Z_{OM,V,CG,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[EUR]	$W_{e,CG,k}^{i,j}, \delta_{CG,k}^{i,j}$ (3.26)	
ET	$W_{e,I,N}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$W_{e,I,N}^{i,j}$ (3.42)
	$W_{e,E,N}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$W_{e,E,N}^{i,j}$ (3.43)
	$W_{e,I,G}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$W_{e,I,N}^{i,j}, \delta_{ETI}^{i,j}$ (3.44)
	$W_{e,E,G}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$W_{e,E,N}^{i,j}, \delta_{ETE}^{i,j}$ (3.45)
	$W_{e,Grid}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$W_{e,I,N}^{i,j}, W_{e,E,N}^{i,j}, \delta_{ETE}^{i,j}$ (3.53)
	$Z_{OM,V,ET,k}^{i,j}$	$\forall i, j$	[EUR]	$W_{e,I,N}^{i,j}, W_{e,E,N}^{i,j}, \delta_{ETI}^{i,j}, \delta_{ETE}^{i,j}$ (3.26)
CH	$Q_{t,CH,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$Q_{t,CH,k}^{i,j}$ (3.54)
	$Q_{f,CH,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$Q_{t,CH,k}^{i,j}, \delta_{CH,k}^{i,j}, \delta_{CH,k}^{i,j-1}, \delta_{CH,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{CH,k}^{i,j-n_\sigma}, \delta_{CH,k}^{i,j+1}$ (3.56)
	$Q_{\sigma,f,CH,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{CH,k}^{i,j}, \delta_{CH,k}^{i,j-1}, \delta_{CH,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{CH,k}^{i,j-n_\sigma}$ (3.13)
	$Q_{\zeta,f,CH,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{CH,k}^{i,j}, \delta_{CH,k}^{i,j+1}$ (3.14)
	$W_{x,CH,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$Q_{t,CH,k}^{i,j}, \delta_{CH,k}^{i,j}, \delta_{CH,k}^{i,j-1}, \delta_{CH,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{CH,k}^{i,j-n_\sigma}, \delta_{CH,k}^{i,j+1}$ (3.57)
	$W_{\sigma,x,CH,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{CH,k}^{i,j}, \delta_{CH,k}^{i,j-1}, \delta_{CH,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{CH,k}^{i,j-n_\sigma}$ (3.13)
	$W_{\zeta,x,CH,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{CH,k}^{i,j}, \delta_{CH,k}^{i,j+1}$ (3.14)
	$Z_{OM,V,CH,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[EUR]	$Q_{t,CH,k}^{i,j}, \delta_{CH,k}^{i,j}$ (3.26)

**Tabela 3.3.** Najvažnije zavisne veličine za komponente za hlađenje

K.	Oznaka		Jedinica	Povezane veličine	Jednačina
AR	$Q_{r,AR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,AR,k}^{i,j}$	(3.58)
	$Q_{t,AR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,AR,k}^{i,j}, \delta_{AR,k}^{i,j}, \delta_{AR,k}^{i,j-1}, \delta_{AR,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{AR,k}^{i,j-n_\sigma}, \delta_{AR,k}^{i,j+1}$	(3.63)
	$Q_{\sigma,t,AR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{AR,k}^{i,j}, \delta_{AR,k}^{i,j-1}, \delta_{AR,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{AR,k}^{i,j-n_\sigma}$	(3.13)
	$Q_{\zeta,t,AR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{AR,k}^{i,j}, \delta_{AR,k}^{i,j+1}$	(3.14)
	$W_{x,AR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,AR,k}^{i,j}, \delta_{AR,k}^{i,j}, \delta_{AR,k}^{i,j-1}, \delta_{AR,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{AR,k}^{i,j-n_\sigma}, \delta_{AR,k}^{i,j+1}$	(3.64)
	$W_{\sigma,x,AR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{AR,k}^{i,j}, \delta_{AR,k}^{i,j-1}, \delta_{AR,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{AR,k}^{i,j-n_\sigma}$	(3.13)
	$W_{\zeta,x,AR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{AR,k}^{i,j}, \delta_{AR,k}^{i,j+1}$	(3.14)
	$Q_{0,AR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,AR,k}^{i,j}, \delta_{AR,k}^{i,j}, \delta_{AR,k}^{i,j-1}, \delta_{AR,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{AR,k}^{i,j-n_\sigma}, \delta_{AR,k}^{i,j+1}$	(3.66)
$Z_{OM,V,AR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[EUR]	$\dot{Q}_{r,AR,k}^{i,j}, \delta_{AR,k}^{i,j}$	(3.26)	
CR	$Q_{r,CR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,CR,k}^{i,j}$	(3.59)
	$W_{x,CR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,CR,k}^{i,j}, \delta_{CR,k}^{i,j}, \delta_{CR,k}^{i,j-1}, \delta_{CR,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{CR,k}^{i,j-n_\sigma}, \delta_{CR,k}^{i,j+1}$	(3.65)
	$W_{\sigma,x,CR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{CR,k}^{i,j}, \delta_{CR,k}^{i,j-1}, \delta_{CR,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{CR,k}^{i,j-n_\sigma}$	(3.13)
	$W_{\zeta,x,CR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{CR,k}^{i,j}, \delta_{CR,k}^{i,j+1}$	(3.14)
	$Q_{0,CR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,CR,k}^{i,j}, \delta_{CR,k}^{i,j}, \delta_{CR,k}^{i,j-1}, \delta_{CR,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{CR,k}^{i,j-n_\sigma}, \delta_{CR,k}^{i,j+1}$	(3.67)
	$Z_{OM,V,CR,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[EUR]	$\dot{Q}_{r,CR,k}^{i,j}, \delta_{CR,k}^{i,j}$	(3.26)
CT	$Q_{r,CT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,CT,k}^{i,j}$	(3.60)
	$W_{x,CT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,CT,k}^{i,j}, \delta_{CT,k}^{i,j}, \delta_{CT,k}^{i,j-1}, \delta_{CT,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{CT,k}^{i,j-n_\sigma}, \delta_{CT,k}^{i,j+1}$	(3.70)
	$W_{\sigma,x,CT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{CT,k}^{i,j}, \delta_{CT,k}^{i,j-1}, \delta_{CT,k}^{i,j-2}, \dots, \delta_{CT,k}^{i,j-n_\sigma}$	(3.13)
	$W_{\zeta,x,CT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[kWh]	$\delta_{CT,k}^{i,j}, \delta_{CT,k}^{i,j+1}$	(3.14)
	$Z_{OM,V,CT,k}^{i,j}$	$\forall i, j, k$	[EUR]	$\dot{Q}_{r,CT,k}^{i,j}, \delta_{CT,k}^{i,j}$	(3.26)

### 3.4.4. Ograničenja

Metodologija rešavanja problema optimizacije strukturnih i projektnih parametara koja je ovde prikazana se odlikuje značajnom fleksibilnošću, tako da se na ove parametre mogu primeniti razna ograničenja koja ne moraju biti predstavljena jednačinama ili nejednačinama veze. Takva su npr. ograničenja kojima se nameće neophodnost ili poželjnost zadovoljenja potreba korisnika tokom projektnih perioda. Pored toga, može se ograničavati kapacitet komponenata, prihvatljive vrednosti finansijskih parametara i dr. Prikazani pristup optimizaciji strukturnih, projektnih i radnih parametara je takav da se mogu razmatrati i meka ograničenja, tj. vrednovati stepen njihovog zadovoljenja. Zavisno od izabranog pristupa, mogu se koristiti i ograničenja kojima se povezuju strukturni i projektni parametri sa jedne i radni parametri sa druge strane, npr. nejednačina (3.1).

**Tabela 3.4.** Najvažnije zavisne veličine za akumulatore toplotne energije

K.	Oznaka		Jedinica	Povezane veličine	Jednačina
TS	$\dot{Q}_{t,TS,N}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kW]	$\dot{Q}_{t,TS,I}^{i,j}, \dot{Q}_{t,TS,E}^{i,j}, \delta_{TS,I}^{i,j}, \delta_{TS,E}^{i,j}, \delta_{TS}^i$	(3.89)
	$Q_{t,TS,I}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$\dot{Q}_{t,TS,I}^{i,j}$	(3.73)
	$Q_{t,TS,E}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$\dot{Q}_{t,TS,E}^{i,j}$	(3.74)
	$Q_{t,TS}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$\dot{Q}_{t,TS,I}^{i,j}, \dot{Q}_{t,TS,E}^{i,j}$	(3.97)
	$W_{x,TS}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$\dot{Q}_{t,TS,I}^{i,j}, \dot{Q}_{t,TS,E}^{i,j}, \delta_{TS,I}^{i,j}, \delta_{TS,E}^{i,j}, \delta_{TS}^i$	(3.99)
	$Z_{OM,V,TS}^{i,j}$	$\forall i, j$	[EUR]	$\dot{Q}_{t,TS,I}^{i,j}, \dot{Q}_{t,TS,E}^{i,j}, \delta_{TS,I}^{i,j}, \delta_{TS,E}^{i,j}, \delta_{TS}^i$	(3.26)
RS	$\dot{Q}_{r,RS,N}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kW]	$\dot{Q}_{r,RS,I}^{i,j}, \dot{Q}_{r,RS,E}^{i,j}, \delta_{RS,I}^{i,j}, \delta_{RS,E}^{i,j}, \delta_{RS}^i$	(3.90)
	$Q_{r,RS,I}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,RS,I}^{i,j}$	(3.75)
	$Q_{r,RS,E}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,RS,E}^{i,j}$	(3.76)
	$Q_{r,RS}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,RS,I}^{i,j}, \dot{Q}_{r,RS,E}^{i,j}$	(3.98)
	$W_{x,RS}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	$\dot{Q}_{r,RS,I}^{i,j}, \dot{Q}_{r,RS,E}^{i,j}, \delta_{RS,I}^{i,j}, \delta_{RS,E}^{i,j}, \delta_{RS}^i$	(3.100)
	$Z_{OM,V,RS}^{i,j}$	$\forall i, j$	[EUR]	$\dot{Q}_{r,RS,I}^{i,j}, \dot{Q}_{r,RS,E}^{i,j}, \delta_{RS,I}^{i,j}, \delta_{RS,E}^{i,j}, \delta_{RS}^i$	(3.26)

**Tabela 3.5.** Najvažnije zavisne veličine koje povezuju više komponentata

Oznaka		Jedinica	Povezane komponente	Jednačina
$Z_V^{i,j}$	$\forall i, j$	[EUR]	CG, ET, CH, AR, CR, CT, TS, RS	(3.104)
$Z_V$		[EUR]	CG, ET, CH, AR, CR, CT, TS, RS	(3.105)
$Z_T$		[EUR]	CG, ET, CH, AR, CR, CT, TS, RS	(3.106)
$E_P^{i,j}$	$\forall i, j$	[kWh]	CG, ET, CH	(3.108)
$m_{GHG}^{i,j}$	$\forall i, j$	[kg CO <sub>2</sub> e]	CG, ET, CH	(3.109)

Osnovna ograničenja problema optimizacije radnog režima postrojenja definisana u matematičkom modelu i predstavljena jednačinama i nejednačinama veze definišu se za svaki posmatrani vremenski korak  $i, j$  i mogu se klasifikovati na sledeći način:

- ograničenja koja se odnose samo na jednu komponentu, jednu ili više nezavisno promenljivih veličina i jedan vremenski korak, uslovljena tehničkim karakteristikama konkretne komponente i eventualno stanjem spoljašnjeg vazduha, predstavljena nejednačinama:
  - za kogenerativne jedinice, (3.31) i (3.35)–(3.37),
  - za transformatore električne energije, (3.46)–(3.48) i opciono (3.52),
  - za kotlove, (3.55),
  - za apsorpcione rashladne uređaje, (3.61),

- za kompresorske rashladne uređaje, (3.62),
- za rashladne tornjeve, (3.68),
- za tople akumulatore energije, (3.77) i (3.78),
- za hladne akumulatore energije, (3.79) i (3.80),
- ograničenja koja se odnose na jednu komponentu, više nezavisno promenljivih veličina i više vremenskih koraka, npr. (3.81)–(3.88), jer se kod akumulatora svaka temperatura medijuma odnosi na trenutak između dva vremenska koraka, kao i opcionalna ograničenja korišćenja akumulatora energije (3.95) i (3.96),
- ograničenja kojima se obuhvataju energetske tokovi više komponentata i više nezavisno promenljivih veličina, ali obuhvataju samo jedan vremenski korak, kao što su nejednačine (3.50) i (3.51) kojima se ne dozvoljava isporuka veće količine električne energije mreži od energije proizvedene kogeneracijom,
- ograničenja kojima se definišu bilansi energetskih tokova unutar jedne ili između više komponentata, koja obuhvataju više nezavisno promenljivih veličina i više vremenskih koraka, predstavljena jednačinama:
  - bilansa energije rashladnog tornja (3.69), prema kome je toplotna energija odvedena iz sistema preko rashladnog tornja jednaka sumi odbačenih količina toplotne energije iz rashladnih mašina i eventualno kogenerativnih jedinica,
  - bilansa energije toplog i hladnog akumulatora (3.93) i (3.94),
  - bilansa proizvodnje i potražnje električne energije, kao i toplotne energije za grejanje i hlađenje (3.101)–(3.103),
- pomoćna ograničenja (3.17) odnosno (3.18) koja se odnose na pomoćne nezavisno promenljive veličine  $\sigma_{k,1}^{i,j}, \sigma_{k,2}^{i,j}, \dots, \sigma_{k,n_\sigma}^{i,j}$  i  $\zeta_{1,k}^{i,j}$  i definišu kada se formuliše problem mešovitog celobrojnog linearnog programiranja,
- pomoćna ograničenja koja se javljaju prilikom aproksimacije nelinearnih odnosa linearnim.

Pored pomenutih osnovnih ograničenja, moguće je dodati i mnoga druga, npr. nejednačinu veze (3.110), ograničenje dozvoljene promene opterećenja u toku jednog vremenskog koraka (3.20), ograničenja vremena tokom koga neka komponenta radi ili ne radi (3.21)–(3.23), ograničenja kojima se određenim komponentama daje prioritet u radu u odnosu na druge (3.24) ili neke posebne projektne zahteve. Pored pomenutih, postoji još mnogo mogućih ograničenja koja se mogu dodati zavisno od strukture postrojenja, vrsta komponentata, pravila kojima se definiše svrha i način rada sistema za snabdevanje energijom itd.

### 3.4.5. Funkcije cilja

#### 3.4.5.1. Finansijske i ekonomske funkcije cilja

Najčešće se u literaturi, kao i u praksi koriste finansijske ili ekonomske funkcije cilja. Ukoliko se optimizuju strukturni, projektni i radni parametri sistema za snabdevanje energijom na bazi razmatranja jedne tipične godine, pogodno je kao cilj optimizacije definisati određivanje nezavisno promenljivih veličina za koje se dobijaju minimalni ukupni troškovi na nivou godine, definisani jednačinom (3.106). Kao što je već rečeno, pored cene vlasništva nad sistemom, tj. investicije, ovi troškovi obuhvataju godišnje troškove rada i održavanja, kao i troškove kupljenih energenata i dobiti od prodaje električne energije. Dakle, funkcija cilja problema optimizacije strukturnih, projektnih i radnih parametara se definiše kao:

$$\min Z_T \quad (3.111)$$

Često je potrebno razmatrati period duži od jedne godine. U Direktivi [16] se predlaže uzimanje u obzir celokupnog životnog veka postrojenja, a u [177] ekonomskog veka projekta, tj. vremena trajanja glavnih dobara, koji bi u ovom slučaju mogao biti između 15 i 25 godina. I tada se mogu koristiti ukupni godišnji troškovi kao funkcija cilja, ali u nešto drugačijem obliku. Pre svega, kada je reč o dužim periodima, potrebno je uzeti u razmatranje vremensku vrednost novčanih tokova. Prema [177], najpogodniji finansijski i ekonomski indikatori su neto sadašnja vrednost, interna stopa povraćaja i odnos dobiti i troškova. Određuju se razmatranjem razlika troškova i dobiti između dva scenarija od kojih se jedan odnosi na implementaciju projekta koji se vrednuje, a drugi je alternativni, tj. referentni scenario u kome nema implementacije ovog projekta, već se zadržava postojeće stanje ili, ukoliko ono nije prihvatljivo, uvode minimalne neophodne izmene. Definicije ovih indikatora preuzete su takođe iz [177].

Neto sadašnja vrednost projekta, NPV, predstavlja sadašnju vrednost neto dobiti ostvarenih u toku celog projekta, izraženu u [EUR], tj. sumu diskontovanih neto novčanih tokova za svaku godinu  $y$  u toku projekta. U ovom slučaju, pomenuti indikator, korišćen kao funkcija cilja čiji se maksimum traži, mogao bi se matematički izraziti na sledeći način:

$$\max \text{NPV} = \sum_y \frac{Z_{T,\text{Ref}}^y - Z_T^y}{(1+r)^y} \quad (3.112)$$

Pošto su ukupni troškovi koji se odnose na referentni scenario ulazna, tj. poznata vrednost, kao i diskontna stopa,  $r$ , određivanje maksimuma neto sadašnje vrednosti se svodi na

nalaženje minimuma sume diskontovanih ukupnih troškova projekta za svaku godinu. Zbog toga, u jednostavnijim slučajevima, npr. kada se smatra da su ukupni troškovi u svim godinama isti, funkcije cilja (3.111) i (3.112) mogu biti praktično ekvivalentne.

Interna stopa povraćaja, IRR, je bezdimenziona veličina koja predstavlja diskontnu stopu za koju je neto sadašnja vrednost jednaka nuli. Kao funkcija cilja, ovaj indikator može biti predstavljen na sledeći način:

$$\max \text{IRR}: \sum_y \frac{Z_{T, \text{Ref}}^y - Z_T^y}{(1 + \text{IRR})^y} = 0 \quad (3.113)$$

Interna stopa povraćaja je indikator relativne efikasnosti investicije i treba ga pažljivo koristiti [177]. Ovaj indikator je pogodan jer ne favorizuje veće projekte i ne zahteva diskontnu stopu kao ulazni parametar. Sa druge strane, nedostaci su brojni:

- funkcija cilja (3.113) je komplikovana, pa pored toga što je nelinearna, ona mora biti određivana iterativnim putem, osim u najjednostavnijim slučajevima,
- funkcija cilja (3.113) može imati veći broj nula funkcije i više puta prelaziti iz rastuće u opadajuću i obratno, posebno u slučajevima projekata u kojima se zahtevaju značajne investicije tokom ili na kraju projekta,
- ovaj indikator ne pruža nikakvu konkretnu informaciju o ukupnoj finansijskoj ili ekonomskoj vrednosti projekta,
- ovaj indikator je veoma osetljiv na izbor ekonomskog veka projekta, tj. vremenskog perioda za koji se vrši analiza,
- interna stopa povraćaja se ne može koristiti u slučajevima kada se diskontna stopa menja iz godine u godinu.

Iako ovaj indikator ima nekoliko nedostataka, veoma je bitan, posebno kao sekundarni kriterijum u slučajevima kada se porede projekti sa sličnim neto sadašnjim vrednostima.

Još jedan bezdimenzioni indikator relativne efikasnosti projekta je odnos dobiti i troškova, BCR, koji se definiše kao odnos, tj. količnik sadašnjih vrednosti dobiti i troškova projekta. Ukoliko se ovaj indikator koristi kao funkcija cilja, takođe se traži njegov maksimum. Slično kao i interna stopa povraćaja, odnos dobiti i troškova ne zavisi od veličine projekta, tj. visine investicije, ali takođe i ne pruža nikakvu konkretnu informaciju o ukupnoj vrednosti projekta. Još jedan nedostatak je osetljivost na klasifikaciju efekata projekta na troškove i dobiti u slučajevima kada se neki efekti mogu smatrati i dobitima i smanjenjem troškova.

Iz jednačine (3.106), kojom se definišu ukupni troškovi, može se videti da je za njihovo određivanje potrebno odrediti ukupne varijabilne troškove, definisane jednačinom

(3.105). To dalje znači da je neophodno odrediti ili unapred definisati radni režim. Ovde se pretpostavlja da postrojenje uvek radi u režimu koji je optimalan za zadataku funkciju cilja i definisano postrojenje. Iz jednačine (3.106) se može zaključiti da se minimalni ukupni troškovi mogu postići samo ako se dobiju minimalni varijabilni troškovi, pa se funkcija cilja problema optimizacije radnih parametara definiše kao:

$$\min Z_V \quad (3.114)$$

Izbor ove funkcije cilja je takođe logičan ukoliko se vrši samo kratkoročna optimizacija radnog režima postojećeg postrojenja koji treba da za rezultat ima najveći profit.

Ukoliko se traži optimalni radni režim koji će za posledicu imati najveći profit, funkcija cilja optimizacije radnih parametara se može definisati i kao maksimalni godišnji operativni profit [8]. Godišnji operativni profit se, slično neto sadašnjoj vrednosti, određuje poređenjem novčanih tokova scenarija razmatranog projekta i nekog referentnog scenarija koji ne podrazumeva implementaciju ovog projekta. Za razliku od neto sadašnje vrednosti, pri određivanju operativnog profita se ne uzimaju u obzir troškovi vlasništva nad opremom, tj. investicije, već samo troškovi rada i održavanja i troškovi i dobiti u vezi sa kupovinom i prodajom energenata. Jedan od načina definisanja ove funkcije cilja je:

$$\max \left( Z_{OM,C,Ref} + Z_{V,Ref} - \sum_k Z_{OM,C,k} - Z_V \right) \quad (3.115)$$

Ovako definisana funkcija cilja je ekvivalentna funkciji cilja (3.114) jer izbor referentnog scenarija ne utiče na optimalan radni režim postrojenja, a takođe ni konstantni troškovi rada i održavanja, pa se svi članovi funkcije (3.115) sem poslednjeg mogu smatrati ulaznim vrednostima, tj. konstantama kada je u pitanju problem optimizacije radnog režima postrojenja.

### 3.4.5.2. Ostale funkcije cilja

Najčešće korišćene funkcije cilja kojima se kvantifikuje globalni uticaj na okolinu su potrošnja primarne energije i emisija gasova sa efektom staklene bašte. Potrošnja primarne energije koja se vezuje za rad sistema za snabdevanje energijom je takođe dobar indikator efikasnosti sistema jer se svođenjem na primarnu energiju mogu zajedno kvantifikovati i porediti različiti energetske tokovi: energija goriva, električna energija, toplotna energija itd. Emisija gasova sa efektom staklene bašte je bitna sa aspekta klimatskih promena i, kao što je već pokazano, jedan je od najčešće korišćenih ekoloških kriterijuma optimizacije sistema za snabdevanje energijom. Problem svođenja jedne ovih

veličina na minimum može imati funkciju cilja:

$$\min \sum_i \sum_j E_P^{i,j} \quad (3.116)$$

odnosno

$$\min \sum_i \sum_j m_{\text{GHG}}^{i,j} \quad (3.117)$$

Ovakve funkcije cilja su pogodne kako za optimizaciju strukturnih i projektnih, tako i za optimizaciju radnih parametara. Potrošnja primarne energije i emisija gasova sa efektom staklene bašte definisani su jednačinama (3.108) i (3.109).

Kao i kod finansijskih i ekonomskih funkcija cilja, neto sadašnje vrednosti i godišnjeg operativnog profita, i ove se mogu izraziti poređenjem sa nekim referentnim scenarijom i definisati kao nalaženje maksimalne uštede primarne energije, odnosno maksimalnog smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte. Takođe se mogu koristiti kao indikatori i funkcije cilja ušteda primarne energije i smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte izraženi relativno, tj. podeljeni vrednostima koje se odnose na referentni scenario. Primer takvog indikatora je ušteda primarne energije definisana u Direktivi [16].

Za optimizaciju na nivou životnog ciklusa postrojenja nije dovoljno razmatrati samo potrošnju primarne energije i emisiju gasova sa efektom staklene bašte koje se odnose na fazu rada, tj. eksploatacije sistema za snabdevanje energijom, već je potrebno uzeti u obzir i potrošnju primarne energije, odnosno emisiju gasova sa efektom staklene bašte za ostale faze životnog ciklusa kao što su faze prikupljanja i prerade materijala, izgradnje postrojenja, rušenja postrojenja i odlaganja otpada. Ove dodatne količine potrošene primarne energije i emitovanih gasova sa efektom staklene bašte,  $E_{\text{P,Emb}}$  i  $m_{\text{GHG,Emb}}$ , izražene redom u [kWh] i [kg CO<sub>2</sub>e], zavise od strukturnih i projektnih, ali ne i od radnih parametara postrojenja. Funkcije cilja optimizacije strukturnih i projektnih parametara za ceo životni vek postrojenja se mogu definisati kao:

$$\min E_{\text{P,Emb}} + \sum_y \sum_i \sum_j E_P^{i,j} \quad (3.118)$$

odnosno

$$\min m_{\text{GHG,Emb}} + \sum_y \sum_i \sum_j m_{\text{GHG}}^{i,j} \quad (3.119)$$

Moguće je definisati i druge funkcije cilja. Eksergetska efikasnost je dobar indikator efikasnosti celog sistema jer pruža mogućnost poređenja energetske tokova različitih kvaliteta, gledano sa termodinamičkog i finansijskog aspekta. Što se tiče uticaja na životnu sredinu, pored globalnog zagrevanja, bitan je i uticaj sistema za snabdevanje energijom na bližu okolinu, npr. kvalitet vazduha, pa emisija lokalnih zagađivača takođe može biti korišćena kao funkcija cilja.

### **3.4.6. Klasična formulacija problema višekriterijumske optimizacije**

Problem optimizacije se u opštem slučaju definiše kao problem određivanja vrednosti svih nezavisno promenljivih veličina za koje su zadata ograničenja zadovoljena, a funkcija cilja ima ekstremnu (minimalnu ili maksimalnu) vrednost. Ovakav vektor vrednosti nezavisno promenljivih veličina naziva se optimalnim rešenjem. Svi vektori vrednosti nezavisno promenljivih veličina za koje su sva ograničenja zadovoljena nazivaju se izvodljivim rešenjima. Često problemi optimizacije sa jednom funkcijom cilja imaju mnogo izvodljivih rešenja, ali je samo jedno od njih optimalno. Ukoliko postoji više optimalnih rešenja, ona moraju imati jednake vrednosti funkcije cilja.

Kada je reč o problemima višekriterijumske optimizacije, poznatim i kao problemi minimizacije ili maksimizacije vektora, koji imaju dve ili više međusobno suprotstavljenih funkcija cilja, obično ne postoji samo jedno rešenje, već čitav skup izvodljivih rešenja koja se mogu smatrati optimalnim. Ovakav skup rešenja problema višekriterijumske optimizacije se naziva Pareto skup ili Pareto front, a rešenja koja pripadaju tom skupu su Pareto optimalna ili Pareto efikasna rešenja. Pareto optimalna rešenja su ona kod kojih nije moguće poboljšati vrednost jedne funkcije cilja bez istovremenog pogoršanja vrednosti jedne ili više ostalih funkcija cilja [84]. Drugim rečima, neko izvodljivo rešenje je Pareto optimalno ako ne postoji drugo izvodljivo rešenje kod koga su sve vrednosti funkcija cilja bolje ili jednake, a bar jedna funkcija cilja ima strogo bolju vrednost.

Za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije, ovde se predlaže korišćenje metode  $\varepsilon$ -ograničenja. Ova metoda podrazumeva da jedna funkcija cilja bude zadržana, dok se ostale transformišu u ograničenja koja se dodaju problemu optimizacije [84]. Dakle, ukoliko se problem optimizacije definiše kao određivanje vektora svih nezavisno promenljivih veličina,  $\mathbf{s}$ , za zadati skup ograničenja, tako da  $n$  funkcija cilja,  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , ima što manju vrednost, tada se formulacija cilja optimizacije:

$$\min z_1(\mathbf{s}), \min z_2(\mathbf{s}), \dots, \min z_n(\mathbf{s}) \quad (3.120)$$

menja sledećom:

$$\min z_1(\mathbf{s}) \quad (3.121)$$

$$z_l(\mathbf{s}) \leq \varepsilon_l, \quad \forall l \in \{2, 3, \dots, n\} \quad (3.122)$$

gde je  $\mathbf{s} \in S$ ,  $S$  skup svih izvodljivih rešenja problema optimizacije, a  $\varepsilon_l$  ograničenja funkcija cilja. Pareto optimalna rešenja se dobijaju ponavljanjem procedure optimizacije sa parametričkim variranjem vrednosti  $\varepsilon_l$ . Vrednosti  $\varepsilon_l$  za svako  $l \in \{2, 3, \dots, n\}$  se mogu kretati između minimalne vrednosti odgovarajuće funkcije,  $z_{l,\min}$ , dobijene rešavanjem originalnog problema optimizacije sa jednom funkcijom cilja,  $z_l(\mathbf{s})$ , i anti-idealne, tj. najlošije prihvatljive vrednosti  $z_l^*$ , koja bi mogla da odgovara vrednosti funkcije  $z_l(\mathbf{s})$  dobijenoj prilikom rešavanja problema optimizacije sa nekom drugom funkcijom cilja.

Najčešće korišćena alternativa metodi  $\varepsilon$ -ograničenja podrazumeva skalarizaciju funkcije cilja, tj. definisanje nove, jedinstvene funkcije cilja kao kombinacije zadatih funkcija cilja. Ova kombinacija može biti definisana na različite načine, ali je najčešće linearna:

$$\min z = \sum_{l=1}^n \omega_l z_l(\mathbf{s}) \quad (3.123)$$

gde je  $\omega_l$  težinski faktor koji odgovara funkciji cilja  $z_l(\mathbf{s})$  i definiše njen relativni značaj u odnosu na ostale funkcije cilja. Pareto skup se dobija ponavljanjem procedure optimizacije sa parametričkim variranjem vrednosti  $\omega_l$ .

Ovaj pristup ima dva glavna nedostatka. Prvi je taj što se očekivane vrednosti funkcija cilja mogu znatno razlikovati, tj. mogu biti različitih redova veličine, pa i o tome treba voditi računa prilikom definisanja i variranja težinskih faktora. Drugi i važniji je problem konveksnosti, tj. nemogućnosti identifikacije Pareto optimalnih rešenja koja se nalaze na nekonveksnom delu Pareto fronta, ukoliko takav deo postoji [88].

Postoji još dosta metoda formulacije problema višekriterijumske optimizacije, kao što su: metoda globalnog kriterijuma, metoda ograničene funkcije cilja, leksikografska metoda, metoda programiranja cilja, itd. [21]. Pomenute metode bi mogle biti primenjene u okviru pristupa koji je prikazan u ovoj disertaciji.

Ipak, ovde se preporučuje samo primena metode  $\varepsilon$ -ograničenja. Ukoliko ova metoda ne zadovoljava potrebe za fleksibilnošću i izražavanjem svih potreba ili zahteva donosioca odluka prilikom matematičkog modeliranja, preporučuje se korišćenje metoda formulacije problema višekriterijumske optimizacije na bazi fazi skupova.

### **3.4.7. Fazi formulacija problema višekriterijumske optimizacije**

Fazi logika i fazi programiranje su veoma pogodni za definisanje problema višekriterijumske optimizacije, kao i problema optimizacije sa mekim ograničenjima. Iako u oba slučaja pristup baziran na fazi skupovima nije neophodan, prednosti njegovog korišćenja se ogledaju pre svega u logici formulacije problema i fleksibilnosti koju pruža.

Za razliku od klasičnog matematičkog programiranja gde je rešenje izvodljivo ukoliko zadovoljava sva ograničenja, odnosno neizvodljivo ukoliko postoji bar jedno ograničenje koje nije zadovoljeno, kod pristupa baziranog na fazi skupovima postoji mogućnost prihvatanja i rangiranja rešenja koja ne zadovoljavaju u potpunosti sva ograničenja. Ograničenja koja ne moraju biti u potpunosti zadovoljena nazivaju se mekim ograničenjima, a stepen zadovoljenja svakog od njih se iskazuje posebnom funkcijom pripadnosti,  $\mu(\mathbf{s})$ , koja može imati vrednosti:

- $\mu(\mathbf{s}) = 1$ , ako je ograničenje u potpunosti zadovoljeno,
- $0 < \mu(\mathbf{s}) < 1$ , ako je ograničenje delimično zadovoljeno,
- $\mu(\mathbf{s}) = 0$ , ako je nivo zadovoljenja ograničenja na granici prihvatljivosti.

Pri tome se meka ograničenja ne moraju odnositi na pojedinačne jednačine i nejednačine veze. Na primer, zadovoljenje projektnih zahteva može biti definisano kao meko ograničenje, iako se ne izražava jednom jednačinom ili nejednačinom.

Baš kao što funkcije cilja mogu biti međusobno suprotstavljene jedna drugoj, tako i potpunost zadovoljenja ograničenja može biti u konfliktu sa vrednostima funkcija cilja. Matematički gledano, ako se jedno ograničenje problema optimizacije delimično ili potpuno relaksira, vrednost funkcije cilja će se poboljšati ili ostati ista. Takođe, ukoliko se ograničenje pooštri, vrednost funkcije cilja će u najboljem slučaju ostati nepromenjena, a može se i pogoršati. Vrednost varijabilnih troškova se može smanjiti ako se relaksiraju ograničenja vezana za energetske potrebe korisnika, tj. dozvoli da isporučene količine energije budu nešto manje od željenih. Naravno, tako se sa druge strane smanjuje komfor i stepen zadovoljstva korisnika. Ukupni troškovi se mogu smanjiti relaksiranjem ograničenja koja se tiču projektnih zahteva, ali se na taj način povećava verovatnoća da u toku najhladnijih ili najtoplijih dana potrebe korisnika neće biti potpuno zadovoljene.

Funkcije pripadnosti mogu biti definisane na razne načine, u zavisnosti od iskustva i znanja eksperata, preferencija donosioca odluka itd. One mogu biti linearne ili nelinearne, kontinualne ili diskretne. Izbor oblika funkcije pripadnosti je, dakle subjektivna stvar i može značajno uticati na rezultat. U ovome se, između ostalog, ogleda fleksibilnost pristupa zasnovanog na fazi skupovima.

U slučaju problema linearnog ili mešovitog celobrojnog linearnog programiranja, funkcija pripadnosti bi takođe trebalo da bude linearna. Ukoliko je npr. neko ograničenje u potpunosti zadovoljeno ako je vrednost neke linearne funkcije nezavisno promenljivih veličina negativna, tj.  $f_L(\mathbf{s}) \leq 0$ , a može se tolerisati i pozitivna vrednost ne veća od  $\varepsilon$ , gde je  $\varepsilon \geq 0$ , tada se funkcija pripadnosti može definisati kao:

$$\mu(\mathbf{s}) = \begin{cases} 1 & \text{ako je } f_L(\mathbf{s}) \leq 0 \\ 1 - \frac{f_L(\mathbf{s})}{\varepsilon} & \text{ako je } 0 \leq f_L(\mathbf{s}) \leq \varepsilon \\ 0 & \text{ako je } f_L(\mathbf{s}) \geq \varepsilon \end{cases} \quad (3.124)$$

Odnosno, ako se uvede kontinualna pomoćna nezavisno promenljiva veličina  $\lambda$ ,  $0 \leq \lambda \leq 1$ , relaksirana varijanta ograničenja  $f_L(\mathbf{s}) \leq 0$  je:

$$f_L(\mathbf{s}) + \lambda \varepsilon \leq \varepsilon \quad (3.125)$$

Jedan od načina na koji se može uticati na oblik linearne funkcije pripadnosti je variranje vrednosti  $\varepsilon$  i eventualno uvođenje više donje granice vrednosti  $\lambda$ .

Linearna ograničenja koja bi mogla biti predstavljena kao fazi ograničenja su npr. jednačine veze (3.102) i (3.103) u slučaju razmatranja mogućnosti smanjenja termičkog komfora korisnika radi smanjenja varijabilnih troškova postrojenja.

Problemi višekriterijumske optimizacije se definišu tako što se svaka funkcija cilja zameni odgovarajućim mekim ograničenjem, a cilj optimizacije postaje maksimalan nivo zadovoljenja svih mekih ograničenja. Za svaku funkciju cilja je potrebno definisati posebnu funkciju pripadnosti koja ima sledeće vrednosti:

- $\mu(\mathbf{s}) = 1$ , ako funkcija cilja ima najbolju moguću vrednost koja se može postići za prihvatljivo rešenje,
- $0 < \mu(\mathbf{s}) < 1$ , ako funkcija cilja ima prihvatljivu vrednost,
- $\mu(\mathbf{s}) = 0$ , ako funkcija cilja ima vrednost na granici prihvatljivosti, tj. tzv. anti-idealnu vrednost.

I ovde oblik funkcije pripadnosti takođe može biti različit zavisno od slučaja.

Ako je u pitanju problem linearnog ili mešovitog celobrojnog linearnog programiranja, za svaku funkciju cilja  $z_l(\mathbf{s})$  — pod pretpostavkom da se traži njen minimum — funkcija pripadnosti može biti definisana pomoću dve vrednosti: (1) njene najbolje moguće vrednosti,  $z_{l,\min}$ , koju može imati za neko izvodljivo rešenje  $\mathbf{s}$  i (2) anti-idealne, odnosno

najlošije prihvatljive vrednosti,  $z_l^*$ :

$$\mu(\mathbf{s}) = \begin{cases} 1 & \text{ako je } z_l(\mathbf{s}) = z_{l,\min} \\ \frac{z_l^* - z_l(\mathbf{s})}{z_l^* - z_{l,\min}} & \text{ako je } z_{l,\min} \leq z_l(\mathbf{s}) \leq z_l^* \\ 0 & \text{ako je } z_l(\mathbf{s}) = z_l^* \end{cases} \quad (3.126)$$

Nagib linearne funkcije pripadnosti se može kontrolisati pomoću vrednosti anti-idealnog rešenja  $z_l^*$ .

Cilj optimizacije postaje maksimum opšte funkcije pripadnosti,  $\mu(\mathbf{s})$ , koja se može izraziti na više načina. Ovde se razmatraju dva načina. Prvi način podrazumeva da opšta funkcija pripadnosti bude jednaka najmanjoj vrednosti svih funkcija pripadnosti, tj. da se cilj definiše što kompletnije zadovoljenje najmanje zadovoljenog fazi ograničenja:

$$\max \mu(\mathbf{s}) = \min_{q=1}^n \mu_q(\mathbf{s}), \quad \text{odnosno:} \quad \max \lambda \quad (3.127)$$

$$\lambda \leq \mu_q \quad \forall q \in \{1, 2, \dots, n\}$$

Drugi način se svodi na postizanje maksimalnog mogućeg nivoa zadovoljenja aritmetičke sredine svih funkcija pripadnosti:

$$\max \mu(\mathbf{s}) = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n \mu_q(\mathbf{s}), \quad \text{odnosno:} \quad \max \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n \lambda_q \quad (3.128)$$

$$\lambda_q \leq \mu_q \quad \forall q \in \{1, 2, \dots, n\}$$

Prvi način podrazumeva definisanje samo jedne pomoćne nezavisno promenljive veličine  $\lambda$ , a drugi po jedne ovakve veličine za svako fazi ograničenje i svaku funkciju cilja. Prvi način je pogodan ukoliko se želi posebno povesti računa o ograničenjima koja su zadovoljena u najmanjoj meri, dok se kod drugog o njima vodi manje računa. Pooštravanje donje granice nekih vrednosti  $\lambda_q$  ili uvođenje  $\alpha$ -preseka su takođe načini za posebno tretiranje ograničenja koja su zadovoljena u maloj meri. Moguće je kao funkciju cilja definisati i kombinaciju funkcija cilja iz (3.127) i (3.128) [157].

Dakle, korišćenjem fazi pristupa se na identičan način tretiraju funkcije cilja i meka ograničenja, sa krajnjim ciljem da se pronađe prihvatljivo rešenje koje predstavlja najkvalitetniji kompromis između nivoa zadovoljenja mekih ograničenja i postizanja dobrih vrednosti funkcije cilja.

### **3.4.8. Problemi sa dva nivoa optimizacije**

Problemi sa dva (ili više) nivoa optimizacije predstavljaju posebnu kategoriju kod kojih je jedan problem optimizacije deo drugog. Oni se razlikuju od problema višekriterijumske optimizacije i mogu se smatrati generalizacijom problema sa jednim nivoom.

Primer problema sa dva nivoa optimizacije je optimizacija strukture, projektnih i radnih parametara sistema za snabdevanje energijom gde bi funkcija cilja bila npr. definisana jednačinom (3.118) ili (3.119), nekom njihovom (npr. linearnom) kombinacijom ili kombinacijom finansijske i neke druge funkcije cilja, dok bi istovremeno morala da važi pretpostavka da će postrojenje uvek raditi u finansijski optimalnom režimu, tj. prema cilju definisanom jednačinom (3.114). Jasno je da cilj višeg nivoa optimizacije — strukture i projektnih parametara postrojenja — može biti kontradiktoran cilju nižeg nivoa, tj. ograničenju da radni režim mora biti finansijski optimalan. Problem optimizacije radnih parametara ovde je deo problema sveobuhvatne optimizacije sistema, tačnije jedno od njegovih ograničenja.

Rešavanje problema sa dva nivoa optimizacije korišćenjem klasičnih tehnika matematičkog programiranja je dosta komplikovanije od rešavanja problema sa jednim nivoom, posebno ukoliko problem nižeg nivoa ima celobrojne nezavisno promenljive veličine. U tom slučaju, primena klasičnih metoda može biti veoma problematična. Neki predlozi su prikazani u radovima [178–180]. Sa druge strane, metaheurističke tehnike su izuzetno pogodne za primenu u ovakvim slučajevima, posebno za rešavanje problema višeg nivoa.

### **3.4.9. Izlazne veličine**

Cilj korišćenja prikazanog matematičkog modela je:

- određivanje svih vrednosti nezavisno promenljivih veličina koje odgovaraju optimalnom radnom režimu i vrednosti funkcija cilja za zadati skup ograničenja,
- kvantifikacija svih energetske tokova, odnosno određivanje opterećenja, proizvodnje i potrošnje energije svih komponentata za svaki vremenski korak,
- određivanje potrošnje primarne energije na nivou celog postrojenja za svaki vremenski korak, kao i za ceo posmatrani vremenski period,
- određivanje emisije gasova sa efektom staklene bašte na nivou celog postrojenja za svaki vremenski korak, kao i za ceo posmatrani vremenski period,
- određivanje finansijskih i ekonomskih parametara postrojenja, kao što su:

- varijabilni prihodi i rashodi od prodaje i kupovine energenata za svaki vremenski korak, kao i za ceo posmatrani vremenski period,
- varijabilni troškovi rada i održavanja (bez troškova energenata) za svaki vremenski korak, kao i za ceo posmatrani vremenski period,
- konstantni troškovi rada i održavanja,
- ukupni nivelisani godišnji troškovi,
- neto sadašnja vrednost investicije i dr.

## **3.5. Rešavanje problema optimizacije**

### **3.5.1. Optimizacija radnog režima**

Prikazani matematički model postrojenja pogodan je za definisanje mešovitog celobrojnog problema optimizacije radnih parametara. Takođe je prikazano kako se nelinearni odnosi mogu u nekim slučajevima transformisati, a u drugim aproksimirati linearnim. Prema tome, problem optimizacije radnog režima zasnovan na ovom matematičkom modelu se može predstaviti kao problem mešovitog celobrojnog linearnog programiranja.

Ukoliko je reč o problemu kratkoročne optimizacije, tj. ako se razmatra period od jednog ili nekoliko dana, problem se relativno lako i brzo može rešiti za ceo period optimizacije. Situacija je znatno komplikovanija kada je u pitanju optimizacija radnog režima za nešto duže vremenske periode, npr. jednu ili više godina. Ovakve probleme je moguće rešiti integralno, obuhvatanjem celokupnog razmatranog perioda optimizacije. Ipak, to često nije pogodno ili prikladno, posebno kada su u pitanju postrojenja sa relativno malim (npr. dnevnim) akumulatorima toplotne energije i fleksibilnim komponentama za konverziju energije, sposobnim za česte i brze promene opterećenja i režima rada, kao i potrošači koji se odlikuju značajnim varijacijama u potražnji energije na dnevnom, nedeljnom i godišnjem nivou. Razlozi za to su sledeći:

- rešavanje ovakvog problema može biti neprihvatljivo zahtevno sa stanovišta potrebnog vremena i računarskih resursa, pre svega procesora i radne memorije, kada su u pitanju kompleksnija postrojenja i visok nivo detalja koji se uzimaju u obzir,
- nerealno je očekivati da se dugoročna optimizacija radnog režima bazirana na ovde prikazanom matematičkom modelu u praksi realizuje i primeni u slučaju nekog konkretnog postrojenja jer je teško, ako ne i nemoguće, precizno predvideti vrednosti nekih ključnih ulaznih parametara kao što su trenutne potrebe za

energijom, a u nekim slučajevima i cene energenata za period duži od nekoliko dana unapred,

- potražnja energije i visina cena energenata u nekom trenutku ili vremenskom koraku najčešće značajno utiču na optimalni radni režim samo za period od nekoliko dana [112].

Ipak, rešavanje problema optimizacije radnog režima za period od jedne godine može biti korisno prilikom utvrđivanja dugoročne strategije rada postrojenja, posebno ukoliko postoji sezonski akumulator energije, ili kao instrument energetske politike. U tom slučaju je moguće primeniti ovde predloženi matematički model čija se efikasnost može poboljšati heurističkim tehnikama predloženim u radu [132].

Sa druge strane, ukoliko se smatra da se može očekivati da će postrojenje raditi u skladu sa rezultatima kratkoročne optimizacije radnih parametara, koncept rešavanja problema optimizacije radnog režima se može zasnovati na ovoj pretpostavci. Ovde se predlažu dva koncepta određivanja optimalnog radnog režima postrojenja bazirana na kratkoročnoj optimizaciji:

- (1) koncept koji se zasniva na aproksimaciji razmatranog perioda tipičnim periodima, u literaturi najčešće tipičnim danima [98, 128, 133, 174],
- (2) koncept koji se zasniva na korišćenju pokretnog perioda optimizacije [106, 112].

Ova dva koncepta u osnovi mogu imati skoro identičan matematički model, koristiti iste ulazne parametre i biti rešavani primenom istih metoda optimizacije. Pristup sa tipičnim periodima je računarski manje intenzivan i traži manje vremena za rešavanje problema, ali istovremeno zahteva dosta pažnje oko izbora tipičnih perioda i dodatne aproksimacije ulaznih parametara jer to može značajno uticati na kvalitet rešenja.

Koncept na bazi pokretnog perioda optimizacije se može koristiti kao heuristička tehnika prilikom optimizacije radnog režima za celu godinu.

### *3.5.1.1. Koncept zasnovan na aproksimaciji razmatranog perioda*

Ovaj koncept podrazumeva aproksimaciju razmatranog perioda (najčešće je to jedna ili više godina) tipičnim periodima. Kao što je već rečeno, tipični periodi su u literaturi najčešće dani, ali bi mogli biti i nedelje i dr. Svaki tipičan period predstavlja više stvarnih perioda međusobno veoma sličnih u pogledu energetske potrebe korisnika, vremenskih uslova, cena energenata i drugih parametara koji se uzimaju u obzir. Funkcije cilja i ograničenja u kojima se vrši sumiranje po vremenskim koracima treba prilagoditi korišćenju aproksimaciji tako što će se suma za svaku funkciju  $f^{l,j}$  modifikovati na sledeći

način:

$$\sum_i \sum_j f^{i,j} = \sum_{i=1}^{n_{TP}} \left( n^i \sum_{j=0}^{n_\tau-1} f^{i,j} \right) \quad (3.129)$$

gde je  $n_{TP}$  broj razmatranih tipičnih perioda,  $n^i$  broj stvarnih perioda predstavljenih tipičnim periodom  $i$ , a  $n_\tau$  broj vremenskih koraka u toku jednog tipičnog perioda.

Pri korišćenju ovog koncepta se prepostavlja da se pre i posle tipičnog ili projektnog perioda događa isti takav period, sa istim ulaznim parametrima (energetske potrebe korisnika, stanje okolnog vazduha, cene energenata itd), a posledično i istim radnim režimima. Zbog toga ne postoje klasični početni i završni uslovi, već se početni uslovi vezuju za kraj posmatranog perioda, a završni za njegov početak. Npr. smatra se da vremenskom koraku  $i, 0$  prethodi  $i, (n_\tau - 1)$ , odnosno da nakon koraka  $i, (n_\tau - 1)$  dolazi  $i, 0$ . Za posmatrani vremenski korak  $i, j$ , indeks koraka  $i, (j \pm n)$  koji dolazi  $n$  koraka nakon ili pre posmatranog, zapravo se definiše pomoću ostatka pri deljenju (modula), kao  $i, ((j \pm n) \bmod n_\tau)$ , pri čemu se uzima da je ostatak pri deljenju uvek nenegativan.

Problem optimizacije se može rešavati na dva načina:

- (1) definisanjem problema mešovitog celobrojnog linearnog programiranja i korišćenjem adekvatnih tehnika za njegovo rešavanje, tj. metoda kao što su metode grananja i ograničavanja ili grananja i sečenja [98, 133, 174],
- (2) konceptualnom dekompozicijom problema na celobrojni i linearni i kombinovanjem metaheurističkih metoda kao što su genetski algoritmi ili simulirano kaljenje sa tehnikama linearnog programiranja, tj. simpleks metodom ili metodom unutrašnje tačke [128].

Pristup koji podrazumeva korišćenje mešovitog celobrojnog linearnog programiranja zahteva više pažnje tokom kreiranja matematičkog modela, kao i uvođenje pomoćnih binarnih nezavisno promenljivih veličina  $\sigma_{k,1}^{i,j}, \sigma_{k,2}^{i,j}, \dots, \sigma_{k,n_\sigma}^{i,j}$  i  $\zeta_{1,k}^{i,j}$  i dodatnih ograničenja kao što su (3.17) odnosno (3.18) i dr. za svaki vremenski korak  $i, j$ . Ipak, to je postupak koji se može veoma precizno i efikasno sprovesti ukoliko se raspolaže adekvatnim softverskim rešenjem kojim se može zadati, tj. definisati problem optimizacije radnog režima. Ovaj pristup garantuje pronalaženje tačnog rešenja uz mogućnost pronalaženja i prihvatanja približnog rešenja najčešće u kraćem vremenskom intervalu.

Konceptualna dekompozicija problema na celobrojni i linearni je zasnovana na činjenici da, ukoliko bi se sve vrednosti binarnih nezavisno promenljivih veličina  $\delta_k^{i,j}$ , za svaki vremenski korak  $i, j$  i svaku komponentu  $k$  smatrale poznatim, tj. predefinisanim, problem

optimizacije radnog režima bi se sveo na problem linearnog programiranja u kome su zastupljene samo kontinualne nezavisno promenljive veličine. Problem se može rešiti na sledeći način:

- (1) Za određivanje optimalnih vrednosti binarnih nezavisno promenljivih veličina se koristi neka metaheuristička metoda. Ovde se predlaže korišćenje genetskih algoritama ili simuliranog kaljenja. Ove metode se karakterišu određivanjem vrednosti funkcije cilja za svaku ispitivanu kombinaciju nezavisno promenljivih veličina, težeći njenom poboljšanju do optimalne vrednosti.
- (2) Tokom svakog određivanja vrednosti funkcije cilja za zadate vrednosti binarnih nezavisno promenljivih veličina, najpre se izvrše prethodna izračunavanja, zatim se formira problem linearnog programiranja u kome su zastupljene samo kontinualne nezavisno promenljive veličine. Kako su binarne vrednosti zadate, tj. smatraju se ulaznim veličinama u problem linearnog programiranja, to se i vrednosti energije potrebne za puštanje u rad i zaustavljanje komponenata mogu odrediti jednačinama (3.13) i (3.14) pre definisanja linearnog problema i tretirati kao ulazne veličine, tj. konstante. Linearni problem se zatim rešava i optimalne vrednosti nezavisno promenljivih veličina za zadatu kombinaciju binarnih veličina se određuju korišćenjem neke od metoda linearnog programiranja. Ovde se predlaže korišćenje dualne simpleks metode.
- (3) Ukoliko je za zadatu kombinaciju binarnih nezavisno promenljivih veličina nemoguće rešiti linearni problem, ova kombinacija se smatra neizvodljivom i tako tretira.

Pristup zasnovan na konceptualnoj dekompoziciji problema i kombinovanju metaheurističkih metoda i linearnog programiranja pruža izvesnu fleksibilnost, pre svega pri definisanju funkcije cilja koja ne mora biti linearna, tj. može biti veoma složena. Takođe, operacije sa binarnim nezavisno promenljivim veličinama se odvijaju van linearnog problema optimizacije, što pre svega olakšava matematičko modeliranje jer je dozvoljeno koristiti nelinearne odnose, logičke operatore itd. Ovaj pristup podrazumeva korišćenje nešto jednostavnijeg matematičkog modela jer nije potrebno dodavati pomoćne binarne nezavisno promenljive veličine  $\sigma_{k,1}^{i,j}, \sigma_{k,2}^{i,j}, \dots, \sigma_{k,n_\sigma}^{i,j}$  i  $\zeta_{1,k}^{i,j}$  niti ograničenja (3.17) odnosno (3.18). Pored toga, ovaj pristup se pokazao efikasnijim od metode grananja i ograničavanja za veće probleme u radovima [65, 128].

Sa druge strane, ovaj pristup ne može da garantuje pronalaženje optimalnog rešenja, tj. očekuje se da rezultuje približnim rešenjem. Takođe treba reći da ovaj pristup nije poređen sa metodom grananja i sečenja koja je obično efikasnija od metode grananja i ograničavanja, a efikasnost joj se može dodatno povećati ukoliko se dozvoli prihvatanje

približnog rešenja. Kada je nalaženje približnih rešenja u pitanju, treba još napomenuti i da je kod metoda grananja i ograničavanja i grananja i sečenja veoma lako definisati dozvoljenu grešku i držati je u zadatim okvirima, dok sa metaheurističkim metodama to nije slučaj.

**Dekompozicija problema po vremenu.** Kada se vrši optimizacija radnog režima postrojenja za više tipičnih perioda kojima se aproksimiraju razmatrani period i obračunski periodi, u opštem slučaju se definiše i rešava jedan problem optimizacije za sve periode zajedno. Međutim, ovo je potrebno samo u slučaju postojanja ograničenja koja povezuju sve tipične periode. Primer ovakvih ograničenja je dozvoljena potrošnja energije ili uticaj na okolinu u toku jedne godine, kao i ograničenje (3.110). Ako ovakva ograničenja nisu prisutna, moguće je izvršiti dekompoziciju problema po vremenu i posebno definisati i rešavati probleme optimizacije za svaki obračunski period. Ovakva dekompozicija problema ne utiče na kvalitet rešenja, ali može znatno ubrzati postupak njegovog rešavanja jer se više manjih problema linearnog ili mešovitog celobrojnog linearnog programiranja obično brže rešavaju od jednog ekvivalentnog većeg problema. Ukoliko ne postoje ograničenja kojima su povezani tipični periodi u okviru jednog obračunskog perioda, npr. ako nema naplate prema vršnoj električnoj snazi, koja je predstavljena po jednom nezavisno promenljivoj veličinom za svaki obračunski period, moguće je problem optimizacije dalje dekomponovati po vremenu, tj. definisati i rešavati za svaki tipičan period posebno, čime se može postići još kraće vreme rešavanja problema.

Za matematički model kakav je ovde predstavljen nije moguće odvojeno posmatrati vremenske korake za jedan tipičan ili projektni period jer se u nekim ograničenjima javljaju nezavisno promenljive veličine za više vremenskih koraka. Takva su npr. ograničenja vezana za puštanje u rad i zaustavljanje komponenata (3.17) ili (3.18), kao i akumulatore energije (3.93) i (3.94).

Dakle, dekompoziciju po vremenu je moguće sprovesti do nivoa tipičnih perioda, ukoliko oni nisu međusobno povezani ograničenjima. Ukoliko su dva ili više tipičnih perioda povezani nekom jednačinom ili nejednačinom, potrebno ih je zajedno razmatrati, tj. definisati i rešavati zajednički problem optimizacije radnog režima. Zadovoljenje ovakvih ograničenja se može postići i na druge načine, npr. iterativnim dodavanjem „kaznenih“ vrednosti funkciji cilja, ali je to približan i manje sofisticiran pristup.

Ono što ovde neće biti razmatrano, a moglo bi biti važno i korisno, jesu mogućnosti dalje eksploatacije specifičnosti strukture ovog problema optimizacije u cilju njegovog efikasnijeg rešavanja.

### *3.5.1.2. Koncept zasnovan na pokretnom periodu optimizacije*

Ovaj koncept je baziran na pretpostavci da će optimalni radni režim moći da se odredi sa zadovoljavajućom tačnošću samo na osnovu ulaznih vremenski zavisnih podataka za nekoliko dana unapred. Drugim rečima, polazi se od aproksimacije da za planiranje optimalnog rada fleksibilnih postrojenja sa malim (npr. dnevnim) akumulatorima energije nije neophodno uzeti u obzir dugoročnija predviđanja ulaznih parametara.

Matematički model je veoma sličan kao kod koncepta zasnovanog na tipičnim periodima. Osnovna razlika je u početnim i krajnjim uslovima, kao i tretiranju nekih nezavisno promenljivih veličina za akumulatore energije. Pošto nema tipičnih perioda, za ceo posmatrani period se koristi isti indeks  $i$ .

Postupak optimizacije se sprovodi kao niz kratkoročnih optimizacija radnog režima — za različite kratke periode optimizacije koji se preklapaju i kojima je obuhvaćen čitav razmatrani period. Period optimizacije, tj. period za koji se sprovodi procedura kratkoročne optimizacije radnih parametara, može se podeliti na dva dela: (1) početni ili glavni deo — za koji se rezultati optimizacije čuvaju u memoriji kao konačne vrednosti i (2) dodatni period — koji služi da bi se uzela u obzir i predviđanja ulaznih parametara nakon glavnog dela perioda optimizacije. Poslednji period ima samo glavni deo.

Postupak optimizacije je zasnovan na pretpostavci da će, iako se optimalni radni režim određuje za ceo period optimizacije, postrojenje raditi u ovom režimu samo tokom početnog, tj. glavnog dela tog perioda. Prema tome, jedna procedura kratkoročne optimizacije zapravo definiše radne parametre samo za početni deo perioda optimizacije uz uzimanje u obzir relevantnih ulaznih parametara (cena energenata, zahteva korisnika itd) za dodatni period (tj. blisku budućnost). Može se reći da razmatranje dodatnog perioda optimizacije u određenoj meri zamenjuje uvođenje krajnjih uslova. Ovaj postupak optimizacije se može rezimirati sledećim algoritmom:

- (1) Definišu se početni i krajnji uslovi za posmatrani period.
- (2) Definiše se i reši problem optimizacije tj. odrede se optimalni radni parametri za prvi period optimizacije čiji se početak poklapa sa početkom razmatranog perioda.
- (3) Dobijene vrednosti radnih parametara, tj. nezavisno promenljivih veličina se zapisuju u memoriju računara.
- (4) Period optimizacije se pomera unapred za jedan korak, tj. za dužinu jednog početnog (glavnog) dela. Početak novog perioda optimizacije poklapa se sa krajem početnog dela prethodnog perioda.
- (5) Definišu se početni uslovi za novi period optimizacije koristeći odgovarajuće

vrednosti binarnih veličina  $\delta_k^{i,j}$  sa početka perioda optimizacije i iz  $n_\sigma$  vremenskih koraka pre početka perioda optimizacije, kao i temperature medijuma akumulatora energije sa početka perioda optimizacije, prethodno određene u koraku (2) ili (6).

- (6) Redefiniše se i ponovo rešava problem optimizacije za novi period optimizacije.
- (7) Dobijene vrednosti radnih parametara se zapisuju u memoriju računara, delom umesto postojećih vrednosti za dodatni period iz prethodnog postupka optimizacije.
- (8) Ponavljaju se koraci (4)–(7) sve dok se ne dođe do kraja razmatranog perioda. Prilikom definisanja problema optimizacije za poslednji period, kao ograničenja se dodaju završni uslovi.

Ukoliko se tokom izvršavanja koraka (2) ili (6) dogodi da nije moguće naći izvodljivo rešenje, procedura se odmah prekida i kao izlazni podatak se daju informacije o neizvodljivosti. Ovaj slučaj bi trebalo sprečiti prethodnom proverom zadovoljenosti projektnih zahteva, tj. ograničenja.

Izbor dužine perioda optimizacije, kao i njegovog početnog i dodatnog dela, pored potreba za preciznošću, zavisi i od realnih mogućnosti preciznog predviđanja ulaznih parametara, kao i strukture samog postrojenja. Na primer, veći akumulator energije zahteva duži dodatni deo perioda optimizacije, dok naplata električne energije prema vršnoj snazi implicira da glavni deo perioda optimizacije bude jednak obračunskom periodu. Pored toga, nije neophodno da dužine svih perioda optimizacije niti njihovih delova budu jednake, već mogu varirati tokom posmatranog perioda.

Komponente za hlađenje — apsorpcione i kompresorske rashladne mašine, rashladne tornjeve i hladni akumulator toplotne energije — je moguće uključiti u razmatranje samo u periodima u kojima ima potrebe za hlađenjem (npr. u toku letnje sezone). Ovo se može postići tako što će se na drugačiji način kreirati problemi optimizacije za različite delove godine ili dodati ograničenja da odgovarajuće vrednosti  $\delta_k^{i,j}$  van sezone hlađenja budu jednake 0, posebno za hladne akumulatore.

Početni i završni uslovi se uglavnom odnose na ograničenja u kojima se javljaju nezavisno promenljive veličine iz više različitih vremenskih koraka. Na početku prvog perioda optimizacije, potrebno je, pre svega, definisati početne temperature medijuma u akumulatoru toplotne energije,  $t_{TS}^{i,0}$  i  $t_{RS}^{i,0}$ , kao i vrednosti binarnih promenljivih  $\delta_k^{i,j}$  za  $n_\sigma$  vremenskih koraka pre početka perioda optimizacije. Temperature u akumulatoru se direktno zadaju tako da važe ograničenja (3.81), (3.82), (3.85) i (3.86), a vrednosti  $\delta_k^{i,j}$  pre perioda optimizacije se smatraju jednakim 0 što nameće potrebu za modifikacijom ograničenja (3.17) odnosno (3.18) za prvih  $n_\sigma$  vremenskih koraka perioda optimizacije:  $\sigma_{k,l}^{i,j} = \delta_k^{i,j}$  kada je  $l > j$ . Na početku svih ostalih perioda optimizacije, potrebno je

predefinirati vrednosti temperatura u akumulatoru i vrednosti  $\delta_k^{i,j}$  komponentata kod kojih se razmatra uticaj puštanja u rad za početni vremenski korak, kao i  $\sigma_{k,l}^{i,j}$  za  $l$  početnih koraka uzimanjem u obzir već poznatih rezultata optimizacije za prethodne periode.

Za poslednji vremenski korak  $i, j$  svakog perioda optimizacije potrebno je dodatno povesti računa da vrednosti temperatura u akumulatoru na kraju tog koraka,  $t_{TS}^{i,j+1}$  i  $t_{RS}^{i,j+1}$ , budu u prihvatljivim granicama. To se može postići izbacivanjem klasičnih jednačina energetskog bilansa (3.93) i (3.94) za ovaj vremenski korak iz problema optimizacije i dodavanjem po dva nova ograničenja nastala modifikacijom obe ove jednačine čiji je zadatak da zamene ograničenja (3.83), (3.84), (3.87) i (3.88). Da bi se osiguralo da svaka komponenta  $k$  bude isključena na kraju poslednjeg perioda optimizacije, potrebno je da za poslednji vremenski korak  $i, j$  važi  $\zeta_k^{i,j} = \delta_k^{i,j}$ , što takođe predstavlja modifikaciju ograničenja (3.17) ili (3.18).

Pošto se početne temperature medijuma akumulatora zadaju kao ulazne veličine, jasno je da one ovde nisu nezavisno promenljive. Ipak, kao što je već rečeno, primećeno je da se problemi optimizacije znatno brže rešavaju ukoliko se sve temperature medijuma akumulatora tretiraju kao nezavisno promenljive veličine i definišu veći ali razudjeniji problemi. Takođe, ni  $\delta_{TS}^i$  i  $\delta_{RS}^i$  nisu nezavisno promenljive, već ulazne (tj. zadate) veličine.

Zadovoljenje ograničenja koja se odnose na celokupne obračunske periode ili celu godinu (npr. raspoloživost nekog energenta tokom jedne godine ili dozvoljeni godišnji uticaj na životnu sredinu) može se postići iterativnim ponavljanjem procedure optimizacije i eventualnim dodavanjem „kaznenih“ vrednosti funkciji cilja. Takođe je moguće relaksirati problem većine ili svih celobrojnih nezavisno promenljivih veličina i rešiti relaksirani problem za celu godinu, a zatim dobijeno rešenje koristiti kao polaznu pretpostavku.

Optimizacija radnog režima za svaki period optimizacije se može, kao i slučaju koncepta na bazi tipičnih perioda, vršiti mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem ili kombinovanjem metaheurističkih metoda i linearnog programiranja. Problemi optimizacije korišćeni u ovom pristupu obuhvataju relativno kratke vremenske periode, pa ih je gotovo uvek efikasnije rešavati mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem.

Ovaj pristup je posebno pogodan za simulaciju donošenja odluka slučajevima postrojenja koja funkcionišu u uslovima liberalizovanog tržišta električnom energijom u kojima je kratkoročno planiranje proizvodnje posebno važno.

U osnovi, kod ovog pristupa se vrši kvalitativno drugačija aproksimacija nego kod alternativa. Kada se koriste tipični periodi, aproksimiraju se prikupljeni relevantni ulazni parametri koji zavise od vremena — energetske potrebe korisnika, cene električne energije, parametri stanja okolnog vazduha, raspoloživost energije Sunca itd. Ako se vrši optimizacija radnog režima za celu godinu odjednom, dobija se jedan veliki problem

optimizacije za čije rešavanje je potrebno dosta vremena i značajni računarski resursi, pa se aproksimacija uglavnom ogleda u uprošćavanju matematičkog modela i definisanju većih dozvoljenih grešaka. Pristup na bazi pokretnog perioda optimizacije zadržava potpuno vremenski zavisne ulazne parametre, visok nivo detalja u matematičkom modelu i nisku ili nultu toleranciju greške, ali ne uzima u obzir celokupni vremenski period prilikom definisanja i sprovođenja procedura optimizacije. To se može opravdati činjenicom da ni donosioci odluka u realnim uslovima to ne mogu činiti zbog nemogućnosti preciznog dugoročnog predviđanja ulaznih parametara. Dakle, u poređenju sa pomenutim alternativnim pristupima, korišćenjem tipičnih perioda i optimizacijom problema za celu godinu odjednom, ovaj pristup ima sledeće prednosti:

- moguća kontrola greške ili nalaženje tačnih rešenja za zadate probleme optimizacije zbog korišćenja mešovitog celobrojnog linearnog programiranja,
- niži zahtevi u pogledu vremena rešavanja i računarskih resursa od pristupa koji podrazumeva rešavanje velikog problema za celu godinu, a kao posledica i mogućnost definisanja detaljnijeg matematičkog modela i niže ili nulte prihvatljive greške,
- pogodan za energetske sisteme sa fleksibilnim komponentama i bez sezonskog skladištenja energije,
- posebno pogodan za simulaciju procesa donošenja odluka u vezi sa radnim parametrima u uslovima liberalizovanog tržišta električne energije,
- mogućnost direktnog korišćenja vremenski zavisnih ulaznih parametara, bez aproksimacije.

dok su nedostaci:

- viši zahtevi u pogledu vremena i resursa od pristupa na bazi tipičnih dana,
- nije pogodan za direktno modeliranje problema sa ograničenjima koja se odnose na duže vremenske periode,
- nije pogodan za postrojenja sa sezonskim skladištenjem energije.

Ova metoda se može koristiti kao heuristički pristup prilikom optimizacije radnih režima za celu godinu odjednom. Sličan pristup, ali za nešto drugačiji tip postrojenja, prikazali su Kjeldsen i Chiarandini [132]. Ideja je da se koncept na bazi pokretnog perioda optimizacije upotrebi za nalaženje izvodljivog heurističkog rešenja bliskog optimalnom, a zatim to rešenje iskoristi kao polazno pri optimizaciji rada za jednu godinu. Dobijeno heurističko rešenje se može brzo i efikasno, ali često samo neznatno, poboljšati ako se definiše novi problem optimizacije za celu godinu, dobijene vrednosti binarnih veličina smatraju konstantama, a odrede se samo nove — poboljšane — vrednosti kontinualnih veličina.

### **3.5.2. Optimizacija strukture i projektnih parametara**

Prilikom optimizacije strukture postrojenja i projektnih parametara komponenta veoma je bitno uzeti u obzir i radne režime. Pristup koji je ovde prikazan omogućava razmatranje radnih režima, a pre svega određivanje optimalnih radnih parametara. Ovaj pristup, kao što je već naglašeno, treba da omogući da se u postupku optimizacije strukturnih i projektnih parametara uzme u obzir što veći broj uticajnih parametara, kao i precizne tehničke i finansijske karakteristike za svaku razmatranu komponentu ponaosob. Pored strukturnih, projektnih i radnih parametara sistema za snabdevanje energijom, potrebno je obezbediti mogućnost uzimanja u obzir implementacije mera energetske efikasnosti na strani potrošača, tj. interakcije efekata promena na strani snabdevača i potrošača.

Ovako definisani zahtevi nameću potrebu da nezavisno promenljive veličine kojima se definišu struktura postrojenja i projektni parametri, budu diskretne, kao i da se problem svede na potragu za najboljom kombinacijom ovih diskretnih vrednosti, tj. definiše kao kombinatorički. Nezavisno promenljive veličine su one kojima se određuje model svake od komponenta između konačnog broja zadatih modela i eventualno broj takvih komponenta koje bi trebalo uključiti u postrojenje. Takođe, nezavisno promenljivim veličinama je moguće definisati skup mera energetske efikasnosti na strani potrošača i posledično uticati na vrednosti potreba potrošača za električnom energijom, grejanjem i hlađenjem.

Prikazani matematički model može se koristiti za rešavanje problema optimizacije strukturnih i projektnih parametara, uz pretpostavku rada postrojenja u optimalnom režimu, na dva načina:

- (1) definisanjem nadstrukture postrojenja i korišćenjem mešovitog celobrojnog linearnog programiranja za rešavanje integrisanog problema optimizacije strukturnih, projektnih i radnih parametara,
- (2) konceptualnom dekompozicijom problema na glavni problem optimizacije strukturnih i projektnih parametara i podproblem optimizacije radnih parametara, što je prikazano u radovima [98, 99, 174].

Prvi način se zasniva na kreiranju nadstrukture postrojenja, tj. modela postrojenja koje sadrži sve razmatrane komponente, a strukturne nezavisno promenljive veličine se koriste za određivanje onih koje ulaze u sastav postrojenja. Pri tome je neophodno:

- koristiti nezavisno promenljive veličine koje se odnose na strukturu postrojenja i projektne parametre,  $\gamma_l$ , gde je  $l \in \{1, 2, \dots, n_\gamma\}$ ,
- izraziti visinu investicije,  $Z_{inv}$ , u zavisnosti od promenljivih  $\gamma_l$ ,

- dodati niz ograničenja tipa (3.1) za svaku komponentu čije se uključivanje u postrojenje razmatra i svaki vremenski korak.

Kao što je već rečeno, matematički model treba da bude pogodan za korišćenje mešovitog celobrojnog linearnog programiranja, a problem je integrisan, tj. sve nezavisno promenljive veličine — strukturne, projektne i radne — se određuju istovremeno.

Prednost ovakvog pristupa je mogućnost, tj. sigurnost dobijanja optimalnog rešenja, dok korišćenje metaheurističkih metoda može da rezultira rešenjem koje je lošije od optimalnog. Sa druge strane, ovakav pristup zahteva kompleksan matematički model sa mnogo nezavisno promenljivih veličina i ograničenja, posebno u slučajevima u kojima se razmatra veliki broj opcija i složena nadstruktura postrojenja. Ipak, ovakav problem se može brzo i pouzdano definisati na osnovu zadate nadstrukture postrojenja korišćenjem adekvatnih softverskih rešenja za tu svrhu.

Imajući u vidu trenutno dostupne računare i softver za mešovito celobrojno linearno programiranje, ovakav pristup može biti veoma problematičan sa aspekta vremena i resursa potrebnih za rešavanje problema zbog njihove veličine. Ovaj zaključak važi za probleme koji se odnose na postrojenja koja se ovde razmatraju i konkretan, ovde prikazan matematički model.

Pristup optimizaciji radnog režima zasnovan na pokretnom periodu optimizacije nije primenljiv u ovom slučaju, pa bi se razmatrani vremenski period morao aproksimirati tipičnim periodima ili rešavati problem za ceo period optimizacije.

Još jedan problematičan aspekt u vezi sa primenom pristupa na bazi nadstrukture postrojenja predstavlja eventualna potreba rešavanja problema optimizacije sa dva nivoa, tj. mogućnost da ciljevi optimizacije radnih parametara i optimizacije strukture i projektnih parametara ne budu međusobno saglasni, tj. budu (donekle) suprotstavljeni. Problemi optimizacije sa dva nivoa (gornji — optimizacija strukture i projektnih parametara i donji — optimizacija radnih parametara) su, kao što je već rečeno, znatno teži za rešavanje klasičnim metodama i posebno problematični ukoliko je problem nižeg nivoa (mešoviti) celobrojni.

Drugi način podrazumeva rešavanje problema korišćenjem konceptualne dekompozicije [58], tj. njegovim razdvajanjem na dva nivoa optimizacije, slično kao u radu [176]:

- (1) optimizacija strukture postrojenja i radnih parametara,
- (2) optimizacija radnog režima.

Prema tome, dobijaju se dva problema optimizacije: (1) glavni problem u kome se određuju strukturni i projektni parametri i (2) unutrašnji podproblem određivanja radnih

parametara. Kao što je već rečeno, glavni problem je kombinatorički jer su strukturne i projektne nezavisno promenljive veličine kojima se definišu tipovi, modeli i broj izabranih komponenata diskretne prirode. U okviru glavnog problema se takođe mogu razmatrati i mere energetske efikasnosti na strani potrošača. Ovaj problem se rešava nekom metaheurističkom metodom. Ovde se koriste sledeće metode:

- genetski algoritam,
- optimizacija rojevima čestica,
- simulirano kaljenje,
- tabu pretraga,

dok su u radovima [98, 99], pored pomenutih metoda, korišćene i optimizacija kolonijom mrava i harmonijska pretraga. Sve pomenute metode su veoma pogodne za rešavanje problema sa diskretnim nezavisno promenljivim veličinama, osim optimizacije rojevima čestica. Ova metoda je u originalu kreirana za kontinualne probleme, ali postoje pokušaji za njenim prilagođavanjem diskretnim problemima [181, 182]. Ipak, ovde je korišćen algoritam opisan u [21], a dobijene vrednosti koordinata u obliku realnih brojeva su jednostavno zaokruživane na najbliže cele brojeve.

Ukoliko postoji mali broj mogućih kombinacija strukturnih i radnih parametara, moguće je ispitati sve kombinacije bez korišćenja metaheurističkih metoda.

Osim navedenih metaheurističkih metoda, mogu se koristiti i druge metode iz ove grupe ili drugačije verzije pomenutih. Postoji veliki broj ovih metoda, a mnoge od njih imaju i više različitih varijanti. Ove metode razlikuje logika kojom se, polazeći od početnih vrednosti nezavisno promenljivih veličina približavaju optimalnom rešenju. Ono što je zajedničko svim metodama koje se mogu koristiti u ovom slučaju jeste to da se vrednost funkcije cilja određuje više (mnogo) puta za različite kombinacije nezavisno promenljivih veličina, iterativno se poboljšava i eventualno približava optimalnoj vrednosti. Svaki put kada se određuje vrednost funkcije cilja za zadata kombinaciju strukturnih i projektnih nezavisno promenljivih veličina, potrebno je odrediti i radne parametre postrojenja rešavanjem unutrašnjeg podproblema optimizacije radnog režima nekim od prikazanih postupaka. Detaljna procedura određivanja vrednosti funkcije cilja za neku kombinaciju strukturnih i projektnih parametara u okviru izabrane metaheurističke metode je sledeća:

- (1) Proverava se da li je zadata kombinacija nezavisno promenljivih veličina već bila razmatrana. Ako jeste, jednostavno se pronalazi njena vrednost funkcije cilja u bazi podataka i prelazi se na korak (6). U suprotnom se prelazi na korak (2).
- (2) Proverava se da li zadata kombinacija nezavisno promenljivih veličina zadovoljava projektne zahteve. Redosled provere zadovoljenosti projektnih zahteva se utvrđuje

za svaki slučaj pojedinačno. Ako nije zadovoljeno neko tvrdo ograničenje, procedura se završava i posmatrana kombinacija se tretira kao neizvodljiva. U slučaju da neko meko ograničenje nije zadovoljeno, dodaje se „kaznena“ vrednost funkciji cilja, ograničenje se relaksira, proverava se ponovo da li može biti zadovoljeno itd. Tretiranje mekih ograničenja može biti definisano na različite načine.

- (3) Za ceo razmatrani period, svaki obračunski period posebno ili svaki tipični period posebno, zavisno od mogućnosti dekompozicije problema po vremenu, radi se sledeće:
  - (a) Konstruiše se unutrašnji podproblem optimizacije radnih parametara na osnovu zadate kombinacije strukturnih i projektnih nezavisno promenljivih veličina, opciono mera energetske efikasnosti na strani potrošača, kao i ulaznih parametara: energetske potreba korisnika, cena energenata, tehničkih karakteristika ispitivanih modela komponenata, stanja okoline itd.
  - (b) Ovaj podproblem se rešava nekim od opisanih pristupa optimizaciji radnog režima.
  - (c) Rešenje ovog podproblema, tj. vrednosti radnih nezavisno promenljivih veličina, kao i vrednost funkcije cilja se zapisuju u memoriju računara.
  - (d) Oslobođaju se računarski resursi korišćeni za rešavanje ovog podproblema.
- (4) Izračunava se vrednost funkcije cilja glavnog problema korišćenjem rešenja podproblema optimizacije radnog režima, ulaznih parametara, podataka o zadovoljenosti projektnih zahteva itd.
- (5) Vrednost funkcije cilja i druge relevantne vrednosti se zapisuju u bazu podataka.
- (6) Vrednost funkcije cilja se predaje glavnom algoritmu izabrane metaheurističke metode.

Konstrukcija podproblema optimizacije radnog režima za svaku ispitivanu kombinaciju strukturnih i projektnih nezavisno promenljivih veličina je jedan od najvažnijih segmenata ovog pristupa. U pitanju je procedura koja se sprovodi precizno odgovarajućim softverskim alatom. Ova procedura je značajno manje zahtevna (moglo bi se reći zanemarljiva) u pogledu vremena trajanja ili potrebnih računarskih resursa u poređenju sa procedurom rešavanja problema optimizacije radnog režima, ali može značajno uticati na povećanje fleksibilnosti u matematičkom modeliranju i smanjenje dimenzija problema optimizacije radnog režima, a time i vremena potrebnog za njegovo rešavanje.

Korišćenje baze podataka u koju se smeštaju vrednosti funkcije cilja, kao i druge relevantne vrednosti nije neophodno, kao ni koraci (1) i (5). Ipak, ovo je korisno jer se time značajno skraćuje vreme rešavanja problema. Naime, pri korišćenju metaheurističkih metoda, često se događa da se jedna ista kombinacija nezavisno promenljivih veličina

ispituje više puta, posebno u kasnijim fazama algoritma, kada se dođe blizu ili do optimalnog rešenja. Uvođenjem ove baze podataka i pomenutih koraka sprečava se ponavljanje identičnih radnji, što je posebno važno za procedure optimizacije radnog režima koje su najzahtevnije u pogledu potrebnog vremena i računarskih resursa.

Problemi optimizacije radnog režima se kreiraju tako da obuhvataju samo komponente koje zaista ulaze u sastav postrojenja, pa nije potrebno koristiti ograničenja (3.1).

Kod pristupa baziranog na korišćenju metaheurističkih metoda se ne može garantovati nalaženje optimalnog rešenja, ali su se ove metode već pokazale veoma pogodnim za optimizaciju energetskih sistema i dobijanje rešenja bliskih (ili jednakih) optimalnim.

Metaheurističke metode i strukturna dekompozicija omogućavaju veliku fleksibilnost u matematičkom modeliranju, tretiranju projektnih zahteva, razmatranju mekih ograničenja, kao i prilikom povećanja efikasnosti rešavanja problema. Funkcija cilja ne mora biti linearna, tj. može biti bilo kog oblika, kao i funkcije pripadnosti, ukoliko se koristi fazi logika, i uopšte sve ono što se ne odnosi direktno na određivanje radnog režima. Funkcija cilja može biti i veličina za čije je određivanje potrebno korišćenje metoda numeričke matematike, što je npr. čest slučaj kod interne stope povraćaja. Ovaj pristup je pogodan za dekompoziciju problema po vremenu. Uz to se radni režimi mogu razmatrati na bilo koji način jer su procesi optimizacije strukturnih i projektnih parametara sa jedne i radnih parametara sa druge strane razdvojeni. To znači da se, zavisno od potreba, može koristiti bilo koji ovde opisan način optimizacije radnih parametara, uključujući pristup baziran na korišćenju pokretnog perioda optimizacije. Pored toga, ovakav pristup je veoma pogodan za rešavanje problema optimizacije sa dva nivoa kod kojih su funkcije cilja suprotstavljene.

Oba pristupa su pogodna i za istovremenu optimizaciju strukturnih i projektnih parametara na strani snabdevača energijom i mera uštede energije na strani potrošača. To se može postići uvođenjem nezavisno promenljivih veličina kojima se definišu mere na strani potrošača i variranjem potrebe za energijom korišćene u ograničenjima (3.101)–(3.103) zavisno od njihovih vrednosti.

Za oba pristupa je moguće koristiti različite metode mešovitog celobrojnog linearnog programiranja. Ovde se koriste metode grananja i ograničavanja i grananja i sečenja.

Ova dva pristupa je moguće kombinovati tako što se pristup sa strukturnom dekompozicijom koristi za brzo nalaženje izvodljivog rešenja bliskog optimalnom, a zatim se dobijeno rešenje koristi kao početno u postupku baziranom na formiranju nadstrukture. Zadavanjem početnog izvodljivog rešenja bliskog (ili jednakog) optimalnom bi se moglo skratiti vreme potrebno za rešavanje problema celobrojnog mešovitog

linearnog programiranja. Takođe, pristup sa strukturnom dekompozicijom se može iskoristiti za brzo dobijanje velikog broja izvodljivih rešenja od kojih su neka bliska optimalnom. Na osnovu ispitanih kombinacija, moguće je izvući zaključke kojima bi se redukovala polazna nadstruktura, tj. izbacile iz razmatranja komponente ili kombinacije koje nisu zastupljene u dobrim rešenjima.

Pomenuti pristupi su poređeni sa aspekta efikasnosti u radu [99], gde su ilustrovane i prednosti njihovog kombinovanja.

### **3.5.3. Povećanje efikasnosti rešavanja problema**

Ukoliko se problem optimizacije definiše kao problem mešovitog celobrojnog linearnog programiranja i rešava metodom grananja i ograničavanja ili grananja i sečenja, u nekim slučajevima je moguće dramatično smanjiti vreme potrebno za rešavanje problema ako se uvede veoma mala tolerancija greške, kao što je pokazano u radu [112].

Naime, prilikom korišćenja metode grananja i ograničavanja ili grananja i sečenja, veoma je bitna razlika (ili jednakost) dveju važnih vrednosti: (1) vrednosti funkcije cilja najboljeg izvodljivog celobrojnog rešenja pronađenog do određenog trenutka i (2) najbolje procenjene, tj. potencijalne vrednosti funkcije cilja optimalnog rešenja u istom trenutku. Prva vrednost je uvek lošija ili jednaka, a druga je uvek bolja ili jednaka vrednosti funkcije cilja pravog optimalnog rešenja. Ova razlika se vremenom smanjuje, a optimalnost se dokazuje činjenicom da je jednaka nuli. Ukoliko se dozvoli mogućnost da se ove dve vrednosti u konačnom rešenju vrlo malo razlikuju (npr. najviše 0,5–2 %), vreme rešavanja problema se može značajno smanjiti. U tom slučaju se algoritam završava kada se nađe dovoljno dobro izvodljivo rešenje blisko optimalnom. Ovo razmatranje je posebno značajno za veće probleme. Treba naglasiti da su stvarne razlike vrednosti funkcija cilja prihvaćenog i optimalnog rešenja nekada značajno manje od dozvoljene greške, pa i jednake nuli, tj. može se dobiti i optimalno rešenje.

Povećanje efikasnosti rešavanja problema metodom grananja i sečenja se može postići podešavanjem prioriteta grananja za celobrojne nezavisno promenljive veličine. Pošto su pomoćne nezavisno promenljive veličine  $\sigma_{k,1}^{i,j}, \sigma_{k,2}^{i,j}, \dots, \sigma_{k,n_\sigma}^{i,j}$  i  $\zeta_{1,k}^{i,j}$  potpuno određene odgovarajućim veličinama  $\delta_k$ , a ove delimično vrednostima  $\gamma$ , može biti korisno da se grananje najpre vrši po veličinama  $\gamma$ , a zatim po  $\delta_k$ . Za manje probleme, primećeno je skraćanje vremena rešavanja za 5–15 %.

Kao što je već rečeno, definisanjem polaznog izvodljivog rešenja bliskom optimalnom se može skratiti vreme potrebno za rešavanje problema celobrojnog mešovitog linearnog programiranja. Naglašeno je da se pristup baziran na pokretnom periodu optimizacije

može upotrebiti za definisanje polaznog rešenja problema optimizacije radnih parametara za period od jedne godine, kao i da se rešenje optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara dobijeno korišćenjem metaheurističkih metoda može iskoristiti kao polazno kada je potrebno problem rešiti metodom grananja i ograničavanja ili grananja i sečenja.

### **3.5.4. Softversko rešenje za optimizaciju sistema za snabdevanje energijom**

U svrhu implementacije opisanog pristupa optimizaciji sistema za snabdevanje energijom, razvijeno je odgovarajuće softversko rešenje čiji su osnovni zadaci:

- definisanje problema optimizacije na osnovu zadate (nad)strukture postrojenja,
- rešavanje problema optimizacije,
- izračunavanje vrednosti izlaznih veličina.

Problemi optimizacije radnog režima kakvi se ovde razmatraju mogu imati od nekoliko hiljada do nekoliko stotina hiljada nezavisno promenljivih veličina i ograničenja, pa bi njihovo definisanje bez odgovarajućeg softverskog alata bilo dugotrajno, a mogućnost pojave grešaka bi bila velika. Kod optimizacije radnog režima na bazi pokretnog perioda optimizacije, problem se definiše nekoliko stotina ili hiljada puta, zavisno od vremenskog koraka i perioda optimizacije, kao i razmatranog perioda. Prilikom optimizacije strukturnih i projektnih parametara korišćenjem metaheurističkih metoda, potrebno je za svaku ispitivanu kombinaciju komponenata sistema posebno definisati problem optimizacije radnog režima. U toku jednog korišćenja neke metaheurističke metode, ovaj problem se definiše i po nekoliko desetina hiljada puta za svaki tipični i projektni period. Uz to, nije moguće predvideti koje će se kombinacije razmatrati. Zbog toga je za primenu ovde prikazanih pristupa optimizaciji energetske sistema veoma bitno korišćenje softvera kojim bi se brzo i precizno definisali problemi optimizacije radnog režima na osnovu zadate strukture postrojenja, tj. izabranih modela i broja komponenata koje ulaze u njegov sastav, odnosno integralni problemi na bazi nadstrukture.

Ovo softversko rešenje, pod nazivom ESO-MS, je objektno-orijentisani alat, razvijen u programskom jeziku C# koji funkcioniše na platformama .Net Framework i Mono i može se koristiti na mnogim operativnim sistemima.

Korišćenje objektno-orijentisanog programiranja veoma je pogodno za ovakvu vrstu softvera, iako se u tu svrhu mogu koristiti i druge paradigme (npr. proceduralno ili funkcionalno programiranje). Klase i objekti, kao osnove koncepta objektno-orijentisanog programiranja, veoma su pogodni za opisivanje i predstavljanje stvarnih komponenata

energetskih sistema. Ovaj pristup programiranju takođe podrazumeva mogućnosti apstrakcije, kao i korišćenja nasleđivanja i polimorfizama, čime se omogućava korišćenje iste komponente softvera više puta na logičan i intuitivan način. Na primer, većina komponentata postrojenja može implementirati identičan kod za binarne promenljive  $\delta_k^{i,j}$ ,  $\sigma_{k,1}^{i,j}, \sigma_{k,2}^{i,j}, \dots, \sigma_{k,n_\sigma}^{i,j}$  i  $\zeta_{1,k}^{i,j}$  i ograničenja vezana za njih, kao i deo koji se odnosi na finansije, tj. troškove investicije, rada i održavanja. Takođe, više komponentata postrojenja može deliti iste objekte kojima se definišu vremenski okvir, cene energenata, stanje okolnog vazduha itd. Značaj i pogodnost objektno-orijentisanog pristupa za rešavanje problema optimizacije energetskih sistema su naglasili Grekas i Frangopoulos [183] i Dvořák i Havel [107]. Objektno-orijentisano programiranje je takođe pogodno za izradu programa za optimizaciju na bazi metaheurističkih metoda.

Definisanje problema optimizacije radnog režima, definisanje strukture i komponentata postrojenja, deo koji se odnosi na korišćenje metaheurističkih metoda i posebno izračunavanje vrednosti izlaznih veličina nisu kritični u pogledu potrebnih računarskih resursa ili vremena. Zato se u tu svrhu mogu koristiti različiti programski jezici i platforme (npr. Python, Java, C#, C++ i dr). Rešavanje problema optimizacije radnog režima korišćenjem linearnog ili mešovitog celobrojnog linearnog programiranja je po prirodi drugačije: zasniva se na linearnoj algebri i brojnim operacijama nad velikim matricama, pa korišćenje objektno-orijentisanog pristupa nije od velike pomoći. Tretiranje ovih problema je veoma zahtevno sa aspekta računarskih resursa i potrebnog vremena, posebno kada su prisutne celobrojne nezavisno promenljive veličine. Zbog toga se posebna pažnja pri kreiranju programa za ovu svrhu posvećuje performansama, tj. brzini, efikasnosti, mogućnosti korišćenja više paralelnih procesa itd, ali i racionalnom korišćenju računarske memorije, pa se uglavnom koriste programski jezici C ili C++.

Pomenuto softversko rešenje je veoma kompleksno. Njegovi najvažniji elementi su:

- glavni element kojim se predstavlja ceo sistem, koji sadrži reference, tj. veze, prema ostalim elementima i povezuje ih funkcionalno, u kome se definišu funkcije cilja i ograničenja koja povezuju više komponentata i preko koga se vrši komunikacija među elementima i izračunavanje izlaznih parametara,
- elementi koji predstavljaju komponente sistema za snabdevanje energijom, koji služe za skladištenje podataka u vezi sa performansama, definisanje funkcija za proračune i koji sadrže nezavisno promenljive veličine vezane za radne režime,
- element kojim se definiše vremenski okvir,
- elementi kojima se definišu zajednički ulazni parametri kao što su cene energenata, faktori za preračunavanje, potrebe korisnika itd,
- element kojim se definiše stanje okolnog vazduha i program za određivanje veličina

stanja vlažnog vazduha,

- šest programa za optimizaciju od kojih svaki implementira po jednu od navedenih metaheurističkih metoda,
- komponenta koja služi za definisanje problema linearnog programiranja ili mešovitog celobrojnog linearnog programiranja i komunikaciju sa eksternim programima za rešavanje ovih problema — slanje podataka i zahteva za rešavanjem, kao i prihvatanje rešenja.

Kao što je rečeno, ovde se za rešavanje problema linearnog i mešovitog celobrojnog linearnog programiranja koriste spoljašnja softverska rešenja koja se povezuju sa softverom ESO-MS: akademske verzije softvera Gurobi Optimizer [184, 185] i Microsoft Solver Foundation [186], kao i rešenje otvorenog koda LP Solve [187]. Svi ilustrovani rezultati dobijeni su korišćenjem softvera Gurobi Optimizer. Naime, za razliku od većine metaheurističkih algoritama, softverska implementacija metoda linearnog programiranja i posebno mešovitog celobrojnog linearnog programiranja je izuzetno kompleksna ukoliko se želi efikasno rešavanje velikih problema. Zbog toga se najčešće upotrebljavaju pomenuta i druga gotova softverska rešenja koja se intenzivno razvijaju godinama od strane eksperata iz oblasti matematike, operacionih istraživanja, računarstva itd.

Glavni element sadrži informacije o strukturi ili nadstrukturi postrojenja i reference prema uključenim komponentama. Strukturu može definisati sam korisnik ili program za metaheurističku optimizaciju. Nadstrukturu definiše isključivo korisnik.

Na osnovu (nad)strukture, ulaznih parametara, tj. podataka o vremenskom okviru, cenama energenata, potrebama korisnika, kao i podataka o performansama komponenta, definiše se problem linearnog ili mešovitog celobrojnog linearnog programiranja koji se može odnositi samo na optimizaciju radnih parametara ili integrisanu optimizaciju strukturnih, projektnih i radnih parametara. Ovaj problem se prosleđuje spoljašnjem programu za rešavanje zajedno sa parametrima kojima se podešava njegov rad (npr. tolerancija greške, početne vrednosti nezavisno promenljivih veličina, željena metoda rešavanja) i zahtevom za rešavanjem problema. Kada spoljašnji program obavi zadatak, rešenje, tj. vrednosti nezavisno promenljivih veličina, se vraća komponenti koja služi za komunikaciju sa njim, zajedno sa još nekim relevantnim informacijama kao što su kvalitet rešenja (optimalno, izvodljivo, neizvodljivo, neograničeno i dr), podaci o mogućoj nepreciznosti, podaci o ograničenjima koja nisu zadovoljena (u slučaju da nije nađeno izvodljivo rešenje) itd. Ukoliko je dobijeno optimalno rešenje, vrednosti nezavisno promenljivih veličina se prosleđuju objektima koji predstavljaju komponente sistema gde se konačno skladište.

Programi za metaheurističku optimizaciju, prilikom svakog određivanja vrednosti funkcija cilja, najpre ispituju zadovoljenost ograničenja koja nisu u direktnoj vezi sa radnim režimima a zatim, ukoliko su ona zadovoljena, definišu strukturu samog postrojenja na osnovu trenutnih vrednosti ispitivanog vektora nezavisno promenljivih veličina. To se postiže komunikacijom sa glavnim elementom. Radni parametri se određuju linearnim ili mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem, a zatim se izračunavaju vrednosti funkcija cilja i vraćaju programu za metaheurističku optimizaciju.

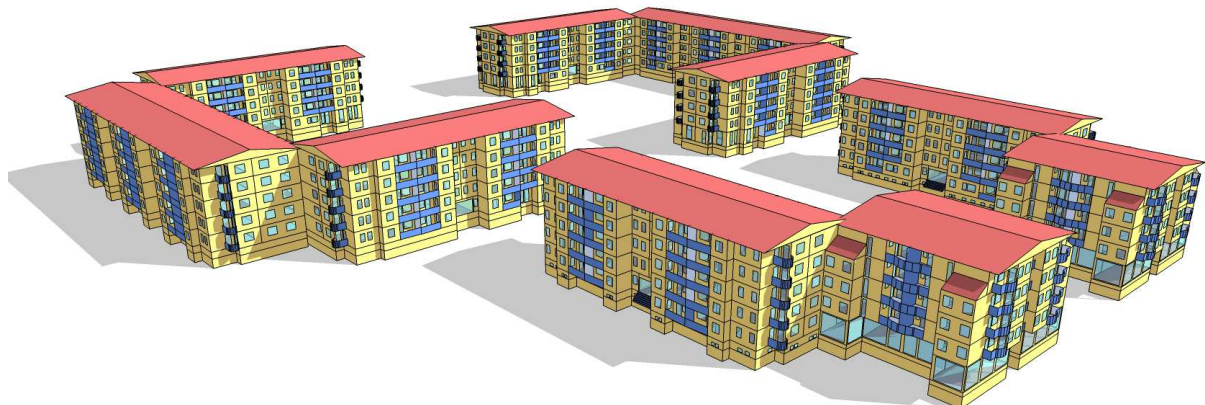
## 4. Primena predložene metodologije

Prikazana metodologija optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara sistema za snabdevanje energijom primenjena je na primeru energetskog snabdevanja stambenog naselja koje se nalazi u Nišu, u Srbiji. Razmatrane su mogućnosti i efekti implementacije energetski efikasnog sistema sa trigeneracijom koji bi služio za potpuno ili delimično zadovoljenje potreba korisnika za električnom energijom, kao i za potpuno zadovoljenje potreba za grejanjem i hlađenjem.

### 4.1. Procena energetskih potreba korisnika

Posmatrano naselje čine stambene zgrade sa lokalima ukupne grejane površine 27045 m<sup>2</sup>. Pretpostavljeno je da će se pre implementacije sistema trigeneracije izvršiti poboljšanje omotača zgrada, tj. izolacija spoljašnjih elemenata omotača i zamena stolarije, što će za posledicu imati smanjenje potrebe za grejanjem.

Časovni profili potrebe za električnom energijom definisani su na osnovu izmerenih vrednosti. Prikupljeni podaci u vezi sa potrebom potrošača za grejanjem nisu relevantni za postupak optimizacije zbog pretpostavke da će se izvršiti poboljšanje omotača zgrada. Promena dnevnih profila opterećenja je takođe moguća. Potrebe za hlađenjem nije moguće precizno utvrditi merenjima. Zbog toga su potrebe za grejanjem i hlađenjem određene na osnovu energetske simulacije naselja softverom EnergyPlus koristeći klimatske podatke za tipičnu meteorološku godinu. Model analiziranog naselja je prikazan na slici 4.1.

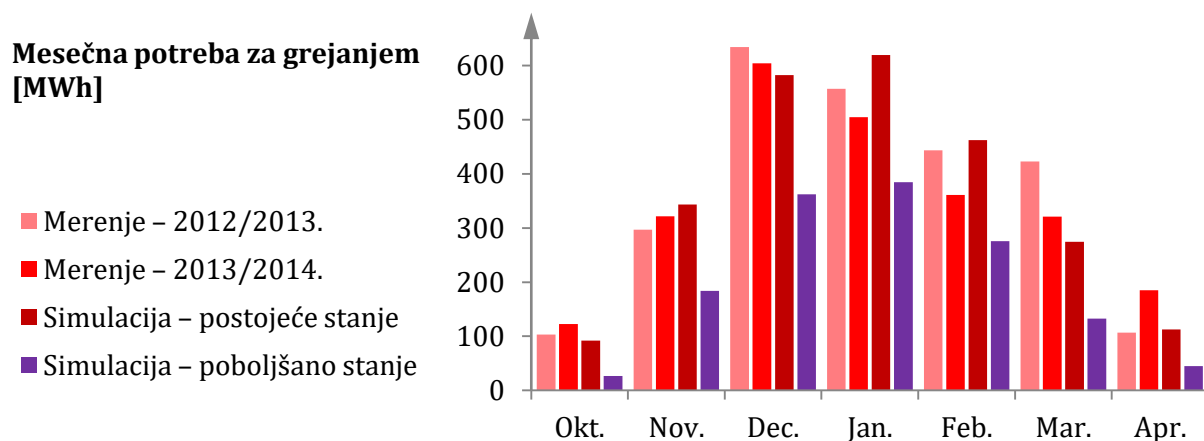


Slika 4.1. 3-D model analiziranog naselja

Sve zgrade u analiziranom naselju su petospratne. Svaki sprat ima po četiri stana različitih površina koji su modelirani kao zasebne toplotne zone. Hodnici, podrumi i tavanški prostori su modelirani posebno, kao negrejane zone. Ukupno ima 524 zone, od čega su 402 grejane. Debljina izolacije spoljašnjih zidova je 5 cm. Usvojena je vrednost infiltracije od 0,6 izmena vazduha na čas zbog relativno lošeg stanja prozora. Pretpostavljeno je da će nakon mera energetske efikasnosti na strani potrošača, tj. poboljšanja omotača zgrada debljina izolacije spoljašnjih zidova, podova i tavanica biti 10 cm, a koeficijenti prolaza toplote 0,33 i 0,36 W/ (m<sup>2</sup> K). Takođe je pretpostavljeno da će postojeći prozori biti zamenjeni novim, sa niskoemisionim dvostrukim staklima punjenim argonom, koeficijentom prolaza toplote 1,56 W/ (m<sup>2</sup> K) i koeficijentom solarnih dobitaka toplote 0,64. Očekuje se smanjenje infiltracije vazduha na 0,3 izmene na čas.

Profili opterećenja, tj. energetske potrebe korisnika zavise i od njihovog broja i ponašanja, pa su odgovarajući rasporedi prisustva ljudi u zgradama i korišćenja energije definisani na dnevnom i godišnjem nivou, na osnovu procene tipičnog ponašanja stanovnika urbanih naselja u Srbiji. Profili se razlikuju za radne i neradne dane, pri čemu su u neradne dane uračunati vikendi i praznici. Takođe su uzete u obzir i sezone godišnjih odmora. Unutrašnje temperature grejanih i hlađenih prostorija su definisane u zavisnosti od doba dana: u toku sezone grejanja temperatura je 22 °C između 6 i 22 h, odnosno 18 °C tokom noći, a u toku sezone hlađenja 26 °C danju i 28 °C noću.

Procenjene godišnje potrebe za električnom energijom, grejanjem i hlađenjem za slučaj nakon mera energetske efikasnosti na strani potrošača su redom oko: 2255 MWh<sub>e</sub>, 1403 MWh<sub>t</sub> i 977 MWh<sub>r</sub>. Na slici 4.2 je prikazano poređenje izmerenih isporučenih količina toplotne energije tokom grejnih sezona 2012/2013. i 2013/2014. sa rezultatima simulacija za postojeće i poboljšano stanje zgrada.



**Slika 4.2.** Poređenje izmerene i simulirane mesečne potrebe za grejanjem razmatranog naselja

## 4.2. Ostali ulazni podaci

Pretpostavljena cena prirodnog gasa na osnovu donje toplotne moći je 0,04 EUR/kWh. Cena električne energije preuzete iz mreže je 0,10 EUR/kWh tokom dana (16 h/dan) i 0,025 EUR/kWh noću (8 h/dan). Električna energija se distributeru prodaje po ceni od 0,10 EUR/kWh. Posmatrani period je 15 godina, a godišnja diskontna stopa 8 %.

Faktori konverzije energije goriva na bazi donje toplotne moći i električne energije u primarnu energiju su redom 1,1 i 2,5 kWh/kWh [188]. Faktori emisije gasova sa efektom staklene bašte za gorivo i električnu energiju su redom 0,20245 kg CO<sub>2</sub>e/kWh, takođe na osnovu donje toplotne moći [189], i 0,74 kg CO<sub>2</sub>e/kWh [190].

Ovi faktori su u funkcijama cilja analogni cenama električne energije i goriva. Konverzioni faktori koji se odnose na gorivo,  $\varphi_f$  i  $\psi_f$ , sa zadovoljavajućom preciznošću se mogu smatrati konstantnim. Nasuprot njima, faktori  $\varphi_e$  i  $\psi_e$ , kojima se prikazuje interakcija sa elektrodistributivnom mrežom, tj. uticaj razmene električne energije, često predstavljaju nepoznanicu. Pošto zavise od karakteristika mnogih proizvođača električne energije, kao i sistema za prenos i distribuciju, mogu se menjati iz časa u čas, mogu se razlikovati danju i noću, kao i sezonski. Aproksimiranje ovih faktora konstantama, kako se najčešće čini, tokom cele godine može biti izvor nepreciznosti, kao što su primetili Rinne i Syri [191]. Matematički model koji je ovde prikazan predviđa definisanje posebnih vrednosti za svaki vremenski korak, ali su one smatrane konstantama zbog nemogućnosti preciznije procene.

## 4.3. Struktura sistema za snabdevanje energijom

Izabrana struktura sistema za snabdevanje energijom i projektni parametri komponenata moraju biti takvi da se može zadovoljiti celokupna potreba potrošača za grejanjem i hlađenjem. Pretpostavljeno je da će sistem biti povezan sa elektrodistributivnom mrežom i da će moći da preuzima i isporučuje energiju mreži, ali ne istovremeno. U sastav razmatranog sistema mogu ući:

- najviše dve kogenerativne jedinice, tj. dva gasna klipna motora sa unutrašnjim sagorevanjem, opsega električnih snaga 315–1464 kW<sub>e</sub>, izabrana između četiri ponuđena modela,
- najviše četiri gasna kotla nominalne toplotne snage 490 kW<sub>t</sub>,
- najviše jedan topao akumulator toplotne energije sa vodom kao medijumom za skladištenje energije, bez promene faza, kapaciteta do 400 t, pri čemu su ponuđena četiri modela,

- najviše jedna jednostepena apsorpciona rashladna mašina, pri čemu je ponuđeno četiri modela u opsegu nominalnih kapaciteta 380–2008 kW<sub>r</sub>
- najviše dve vodom hlađene kompresorske rashladne mašine, pri čemu je ponuđeno četiri modela u opsegu nominalnih kapaciteta 236–842 kW<sub>r</sub>
- najviše jedan hladan akumulator toplotne energije sa vodom kao medijumom za skladištenje energije, bez promene faza, kapaciteta do 360 t, pri čemu su ponuđena četiri modela,
- najmanje jedan, a najviše dva rashladna tornja kapaciteta 500 ili 1000 kW<sub>r</sub>.

Ponuđene opcije strukturnih i projektnih nezavisno promenljivih veličina su prikazane u tabeli 4.1. Kao što je rečeno, ponuđeno je po četiri različita modela kogenerativnih jedinica, apsorpcionih i kompresorskih rashladnih mašina, toplih i hladnih akumulatora energije, dva modela rashladnih tornjeva i jedan model kotlova. Pošto je moguće ne odabrati nijednu od ponuđenih komponenata nekog tipa, kao i odlučivati o broju komponenata koje ulaze u sastav postrojenja, može se smatrati da se, pored optimalnih projektnih parametara komponenata, određuje i optimalna struktura postrojenja. Jasno je da je ovako definisani problem optimizacije strukture i projektnih parametara, tj. izbora optimalne kombinacije komponenata sistema, diskretne i kombinatoričke prirode.

Pretpostavka je da postrojenje uvek radi u finansijski optimalnom režimu, tj. sa minimalnim varijabilnim troškovima, pa je neophodna i optimizacija radnih parametara.

**Tabela 4.1.** Nezavisno promenljive veličine strukture postrojenja i projektnih parametara komponenata

Nezavisno promenljiva veličina			Vrednosti				
Oznaka	Značenje	Domen	0	1	2	3	4
$\gamma_1$	$M_{CG,1}$	0–4	–	315 kW <sub>e</sub>	570 kW <sub>e</sub>	803 kW <sub>e</sub>	1464 kW <sub>e</sub>
$\gamma_2$	$M_{CG,2}$	0– $\gamma_1$	–	315 kW <sub>e</sub>	570 kW <sub>e</sub>	803 kW <sub>e</sub>	1464 kW <sub>e</sub>
$\gamma_3$	$n_{CH}, M_{CH}: 490 \text{ kW}_t$	0–4	0	1	2	3	4
$\gamma_4$	$M_{TS}$	0–4	–	40 t	80 t	160 t	400 t
$\gamma_5$	$M_{AR}$	0–4	–	380 kW <sub>r</sub>	868 kW <sub>r</sub>	1402 kW <sub>r</sub>	2008 kW <sub>r</sub>
$\gamma_6$	$M_{CR,1}$	0–4	–	236 kW <sub>r</sub>	455 kW <sub>r</sub>	641 kW <sub>r</sub>	842 kW <sub>r</sub>
$\gamma_7$	$M_{CR,2}$	0– $\gamma_6$	–	236 kW <sub>r</sub>	455 kW <sub>r</sub>	641 kW <sub>r</sub>	842 kW <sub>r</sub>
$\gamma_8$	$M_{RS}$	0–4	–	160 t	200 t	280 t	360 t
$\gamma_9$	$M_{CT,1}$	1–2		500 kW <sub>r</sub>	1000 kW <sub>r</sub>		
$\gamma_{10}$	$M_{CT,2}$	0– $\gamma_9$	–	500 kW <sub>r</sub>	1000 kW <sub>r</sub>		

## 4.4. Funkcije cilja

Funkcije cilja optimizacije strukture i projektnih parametara postrojenja su ukupni godišnji troškovi,  $Z_T$ , definisani jednačinom (3.111), kao i godišnja potrošnja primarne energije,  $E_p$ , i emisija gasova sa efektom staklene bašte,  $m_{GHG}$ , koje su redom definisane jednačinama (3.108) i (3.109). Pošto je usvojena pretpostavka da postrojenje uvek radi u finansijski optimalnom radnom režimu, pri određivanju funkcije cilja se mora voditi računa da za izabranu strukturu postrojenja i prihvaćene komponente mora da važi uslov iz jednačine (3.114).

U slučaju kada su cilj optimizacije minimalni ukupni troškovi, uslov rada u finansijski optimalnom režimu je implicitno zadovoljen, što se vidi iz jednačine (3.106). Ako je reč o nekoj drugoj funkciji cilja, to ne mora da važi, pa je definisani problem optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara zapravo problem sa dva nivoa optimizacije.

## 4.5. Pristup optimizaciji energetskeg sistema

Problem optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara se može rešiti određivanjem funkcije cilja za sve kombinacije komponenata iz tabele 4.1 i izborom najboljeg rešenja [133]. To je jednostavno i praktično rešenje, pogodno u slučaju malog broja mogućih kombinacija, ali nije prihvatljivo ako je broj kombinacija veliki, a određivanje funkcije cilja za svaku traje relativno dugo jer se vrši rešavanje problema optimizacije radnog režima.

Drugi način određivanja optimalne strukture postrojenja i projektnih parametara komponenata je strukturalna dekompozicija. Najpre se definiše vektor  $\gamma$  sa 10 nezavisno promenljivih diskretnih veličina,  $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6, \gamma_7, \gamma_8, \gamma_9, \gamma_{10})$ . Kao što je prikazano u tabeli 4.1, ove veličine predstavljaju:

- $\gamma_1$  i  $\gamma_2$  — modele motora za kogeneraciju,
- $\gamma_3$  — broj kotlova,
- $\gamma_4$  — model toplog akumulatora energije,
- $\gamma_5$  — model apsorpcione rashladne mašine,
- $\gamma_6$  i  $\gamma_7$  — modele kompresorskih rashladnih mašina,
- $\gamma_8$  — model hladnog akumulatora energije,
- $\gamma_9$  i  $\gamma_{10}$  — modele rashladnih tornjeva.

Vrednost 0 označava da odgovarajuća komponenta ne ulazi u sastav postrojenja, tj. da

nijedan model nije izabran. Gornje granice veličina  $\gamma_2$ ,  $\gamma_7$  i  $\gamma_{10}$  su definisane kao što je prikazano u tabeli 4.1 da bi se izbeglo razmatranje identičnih, tj. simetričnih rešenja jer se vrednosti funkcija cilja ne menjaju ako se zamene vrednosti parovima  $\gamma_1$  i  $\gamma_2$ ,  $\gamma_6$  i  $\gamma_7$ , kao i  $\gamma_9$  i  $\gamma_{10}$ .

Problem određivanja optimalnog vektora  $\boldsymbol{\gamma}$  se vrši nekom metaheurističkom metodom. U ovom slučaju se koriste: genetski algoritam, optimizacija rojevima čestica, simulirano kaljenje i tabu pretraga. Svaki put kada se određuje vrednost funkcije cilja, traži se optimalni radni režim za razmatrane vrednosti  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{10}$ . Radni režim se može određivati kombinacijom linearnog programiranja i metaheurističkih metoda ili mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem. Korišćenjem oba načina se dobijaju identična rešenja, ali je drugi način znatno efikasniji, ali i pouzdaniji jer nema stohastički karakter.

Ukoliko nema kontradiktornosti među funkcijama cilja na različitim nivoima, može se definisati integralni problem mešovitog celobrojnog linearnog programiranja i rešiti nekom od klasičnih metoda, u ovom slučaju metodom grananja i sečenja. Tada je potrebno definisati nadstrukturu sistema sa svim komponentama iz tabele 4.1 (dakle sa po osam kogenerativnih jedinica i kompresorskih rashladnih mašina i po četiri kotla, apsorpcione rashladne mašine, topla i hladna akumulatora i rashladna tornja). Svakoj komponenti se pridružuje po jedna binarna nezavisno promenljiva veličina kojom se definiše da li ulazi u sastav postrojenja  $i$ , u vezi sa njom, po jedno ograničenje definisano jednačinom (3.1) za svaki vremenski korak. Pošto nije moguće izabrati sve razmatrane komponente, potrebno je ograničiti sume odgovarajućih pomenutih binarnih veličina ili uvesti ograničenja u formi specijalnih uređenih skupova tipa 1 (SOS1). Na primer, pošto je moguće izabrati najviše jedan od ponuđenih toplih akumulatora, suma četiri odgovarajuće strukturne binarne veličine treba da bude manja ili jednaka 1, ili sve ove promenljive treba da čine jedan SOS1. Takođe je moguće uvesti dodatne nejednačine veze u cilju eliminisanja simetrije.

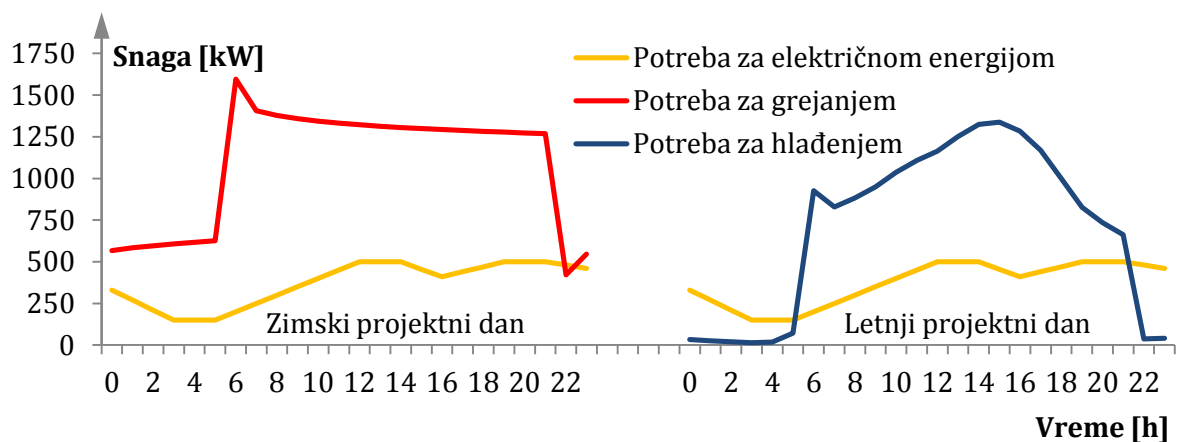
# 5. Analiza rezultata

## 5.1. Primer 1 — Optimizacija strukture, projektnih i radnih parametara

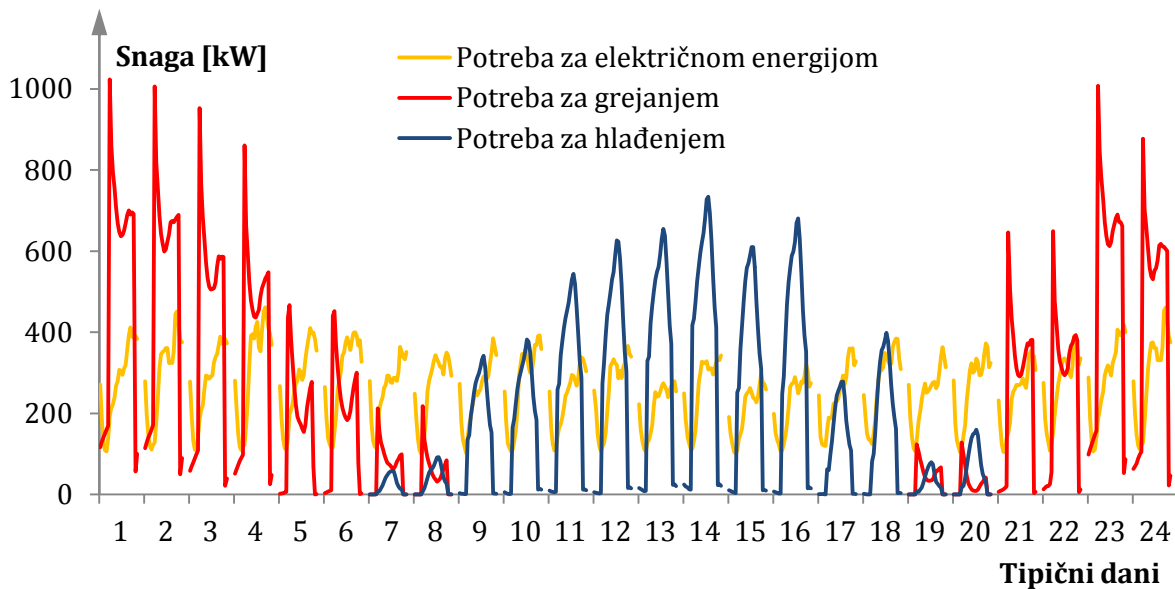
### 5.1.1. Energetske potrebe korisnika

Razmatrana tipična godina je aproksimirana sa dva projektna dana — po jedan za zimski i letnji period, i 24 tipična dana — po jedan radni i neradni dan za svaki mesec. Neradni su dani vikenda i praznični dani. Projektni dani služe samo za ispitivanje mogućnosti razmatranog postrojenja da zadovolji ekstremne energetske potrebe korisnika koje su prikazane na slici 5.1. Tipični dani predstavljaju stvarne dane i odgovarajuće energetske potrebe su ilustrovane na slici 5.2, dok su ostali podaci o tipičnim danima, uključujući broj stvarnih dana koje predstavljaju, dati u tabeli 5.1. Zahvaljujući fleksibilnosti korišćenog softverskog rešenja, za projektne i tipične dane tokom kojih nema potrebe za hlađenjem, problemi optimizacije su konstruisani bez nezavisno promenljivih veličina i ograničenja koje se odnose na komponente za hlađenje i potrebu korisnika za hlađenjem.

U obzir su uzeta samo ona projektna ograničenja koja se odnose na zadovoljenje energetske potrebe korisnika tokom projektnih dana, tj. dana sa ekstremnim zahtevima za energijom. Troškovi, potrošnja energije i emisija gasova sa efektom staklene bašte tokom projektnih dana nisu relevantni, tj. ne ulaze u funkciju cilja, jer se ovakva ekstremna opterećenja veoma retko javljaju. Zato nije neophodno odrediti optimalni radni režim



Slika 5.1. Profili energetske potrebe korisnika za projektne dane



Slika 5.2. Profili energetske potrebe korisnika za tipične dane

tokom ovih dana, već samo utvrditi da li je moguće zadovoljiti potrebe korisnika ili ne. Optimizacija radnih režima za projektne dane se završava kada se nađe prvo izvodljivo rešenje ili se utvrdi da takvo rešenje ne postoji. U prvom slučaju, razmatrani energetski sistem može da zadovolji potrebe korisnika tokom projektih dana. To takođe, u ovom slučaju, znači da sistem može da zadovolji potrebe korisnika i tokom tipičnih dana jer su tada opterećenja niža. U drugom slučaju je reč o problemu koji nema izvodljivo rešenje.

U cilju poboljšanja efikasnosti rešavanja problema moguće je dodati i ograničenja koja se odnose na potrebe kapacitete komponenata. Potrebno je da se pomoću oba izabrana motora, svih kotlova i odabranog punog toplog akumulatora može zadovoljiti maksimalno toplotno opterećenje. Slično, sve rashladne mašine i pun hladni akumulator moraju biti u stanju da zadovolje maksimalno rashladno opterećenje. Ovakva ograničenja će implicitno biti zadovoljena ako postoji izvodljivo rešenje za zimski, odnosno letnji projektni dan, ali mogu biti korisna jer se njima brzo i efikasno eliminišu neka (ne sva) neizvodljiva rešenja.

### 5.1.2. Metodologija optimizacije

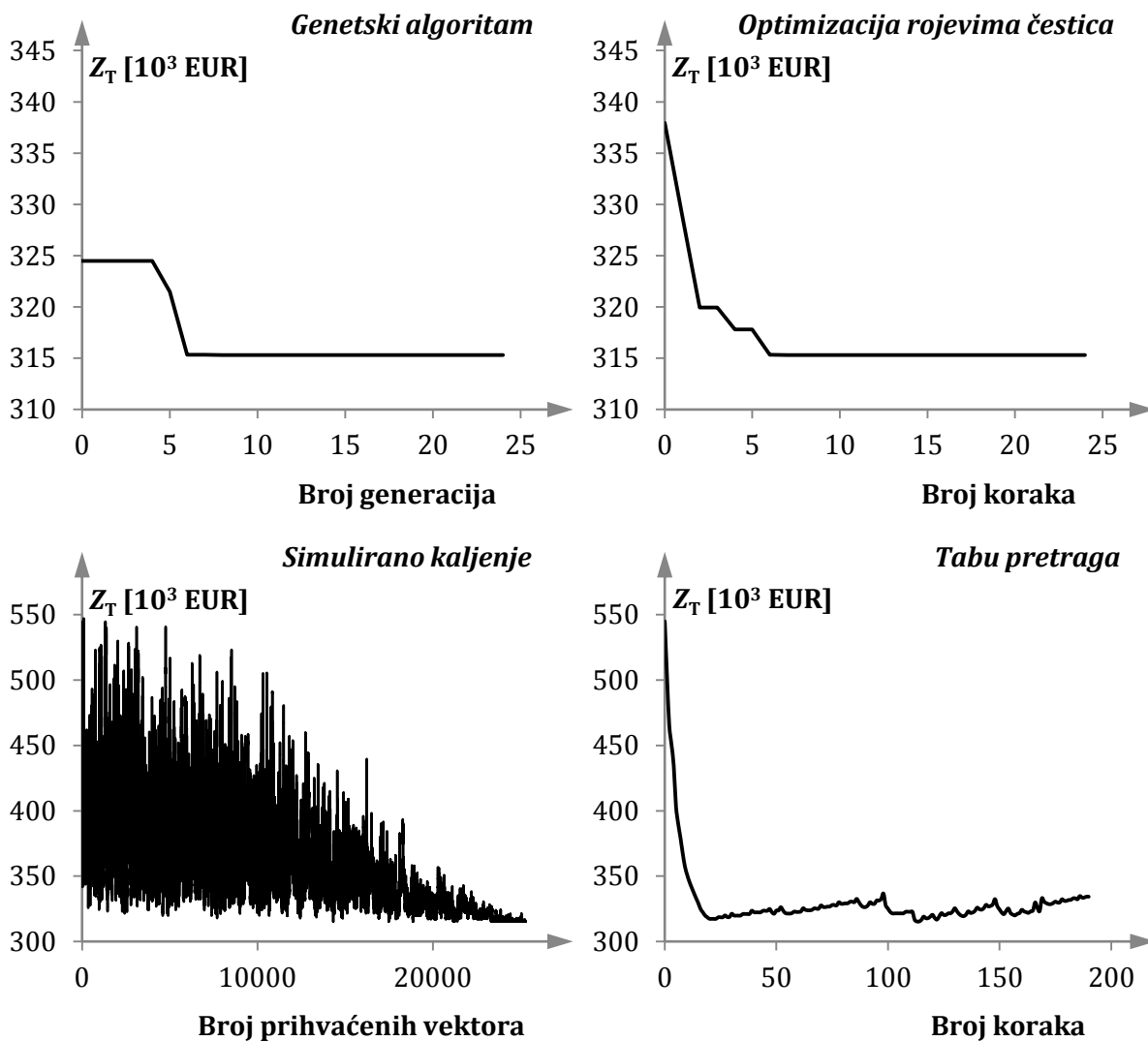
Za rešavanje problema optimizacije strukture, projektih i radnih parametara sa dva nivoa, korišćen je, kao što je rečeno, pristup na bazi strukturne dekompozicije problema. Optimalne vrednosti strukturnih i projektih nezavisno promenljivih veličina, tj. vektora  $\gamma$  određivane su korišćenjem sledećih metaheurističkih metoda: genetski algoritam, optimizacija rojevima čestica, simulirano kaljenje i tabu pretraga.

**Tabela 5.1.** Podaci o tipičnim danima

Redni broj $i$	Mesec –	Tip dana –	Broj stvarnih dana $n_{TD}^i$	Podrazumevani režim rada –
1	Januar	Radni dan	18	Kogeneracija
2	Januar	Neradni dan	13	Kogeneracija
3	Februar	Radni dan	18	Kogeneracija
4	Februar	Neradni dan	10	Kogeneracija
5	Mart	Radni dan	22	Kogeneracija
6	Mart	Neradni dan	9	Kogeneracija
7	April	Radni dan	20	Trigeneracija
8	April	Neradni dan	10	Trigeneracija
9	Maj	Radni dan	20	Trigeneracija
10	Maj	Neradni dan	11	Trigeneracija
11	Jun	Radni dan	22	Trigeneracija
12	Jun	Neradni dan	8	Trigeneracija
13	Jul	Radni dan	23	Trigeneracija
14	Jul	Neradni dan	8	Trigeneracija
15	Avgust	Radni dan	21	Trigeneracija
16	Avgust	Neradni dan	10	Trigeneracija
17	Septembar	Radni dan	22	Trigeneracija
18	Septembar	Neradni dan	8	Trigeneracija
19	Oktobar	Radni dan	22	Trigeneracija
20	Oktobar	Neradni dan	9	Trigeneracija
21	Novembar	Radni dan	20	Kogeneracija
22	Novembar	Neradni dan	10	Kogeneracija
23	Decembar	Radni dan	22	Kogeneracija
24	Decembar	Neradni dan	9	Kogeneracija

Optimizacija radnih parametara energetskog sistema za zadatu strukturu postrojenja i izabrane komponente je vršena kombinovanjem linearnog programiranja i metaheurističkih metoda, slično kao u radu [128], ali i mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem. Prvi način daje tačna ili veoma dobra približna rešenja, baš kao što je zaključeno u [65, 128], ali sa današnjim resursima i softverskim rešenjima, po efikasnosti nije ni blizu drugom načinu. Drugi način, pored toga, uvek daje optimalno rešenje i dozvoljava mogućnost kontrole preciznosti. Bez sumnje, za optimizaciju radnog režima je bolje koristiti mešovito celobrojno linearno programiranje, posebno za manje probleme koji se odnose na jedan ili nekoliko dana.

Sve četiri korišćene metaheurističke metode su rezultirale istim rešenjima, a na slici 5.3 je ilustrovana konvergencija ka finansijski optimalnom rešenju za svaku od ovih metoda. U literaturi se za rešavanje problema optimizacije sa diskretnim nezavisno promenljivim veličinama uglavnom koriste evolutivni algoritmi, genetski algoritmi i sl. Optimizacija rojevima čestica je pogodna i često korišćena za probleme koji imaju samo kontinualne promenljive. Ovde je pokazano da se u tu svrhu mogu koristiti i drugi metaheuristički metodi — npr. simulirano kaljenje i tabu pretraga — kao i da se optimizacija rojevima čestica može koristiti i za diskretne probleme. Ipak treba napomenuti da je u [99] primećeno da ova metoda ima tendenciju preuranjene konvergencije ka rešenjima veoma bliskim optimalnim, kada postoje binarne nezavisno promenljive veličine. Kao što je već rečeno, postoje pokušaji da se optimizacija rojevima čestica prilagodi diskretnim problemima.



**Slika 5.3.** Konvergencija ka finansijski optimalnom rešenju problema optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara sistema za snabdevanje energijom korišćenjem strukturne dekompozicije i metaheurističkih metoda

Pomenute metaheurističke metode se međusobno dosta razlikuju, što daje na značaju činjenici da sve daju ista rešenja. Genetski algoritmi i optimizacija rojevima čestica su bazirane na ispitivanju i poređenju populacija vektora. To ih čini pogodnim za paralelizaciju, tj. istovremeno rešavanje na više računarskih procesora. U ovom slučaju, veličina populacije kod genetskih algoritama bila je 200, a kod optimizacije rojevima čestica 140 vektora. Sa druge strane, simulirano kaljenje i tabu pretraga se zasnivaju na pomeranju jednog vektora, pri čemu je kod druge metode izuzetno izražena zavisnost rezultata od definisanog početnog vektora, koji je u ovom slučaju za sve metode bio  $\gamma = (4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 2, 2)$ . Za razliku od ostale tri metode, tabu pretraga — bar verzija korišćena u ovom slučaju — nije stohastičke prirode, tj. posmatrani vektor će uvek pratiti istu putanju za iste početne vrednosti. Ova metoda je takođe pogodna za paralelizaciju.

Kod metaheurističkih metoda uglavnom nije moguće garantovati da je pronađeno tačno rešenje, kao ni pouzdano odrediti granice greške. To važi i za ovde korišćene metode. Da bi se proverila tačnost dobijenih rešenja, problem optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara je rešavan i korišćenjem pristupa na bazi nadstrukture postrojenja i mešovitog celobrojnog linearnog programiranja. Ovaj pristup je primenjen samo u slučajevima kada problem optimizacije ima jedan nivo, tj. kada su funkcije cilja optimizacije strukture i projektnih parametara sa jedne i radnih parametara sa druge strane saglasne. Pristup koji podrazumeva redukciju nadstrukture je jedan od najčešće primenjivanih u literaturi.

Identična rešenja su dobijena korišćenjem oba pristupa — strukturnom dekompozicijom i redukcijom nadstrukture postrojenja. Time je pokazano da su metaheurističkim metodama dobijena tačna, tj. optimalna rešenja za slučajeve sa jednim nivoom optimizacije. Ovo nije garancija da će se uvek dobiti tačno rešenje, ali je još jedna od brojnih potvrda da su metaheurističke metode veoma pogodne za optimizaciju energetskih sistema i da rezultiraju rešenjima koja su optimalna ili veoma bliska optimalnim.

Pošto je problem mešovitog celobrojnog linearnog programiranja za nadstrukturu postrojenja veliki i kompleksan, vreme potrebno za njegovo rešavanje je znatno skraćeno definisanjem polaznih vrednosti binarnih nezavisno promenljivih veličina dobijenih na osnovu rezultata optimizacije primenom strukturne dekompozicije. Definisanje polaznih vrednosti ne utiče na krajnje rešenje, ali, kao što je rečeno, utiče na vreme rešavanja problema. Dobra rešenja dobijena metaheurističkim metodama takođe mogu biti korišćena za donošenje određenih zaključaka i redukciju nadstrukture postrojenja, a samim tim i smanjenje veličine problema optimizacije [99].

Analiza efikasnosti primenjenih metoda optimizacije je van opsega ove disertacije. Detaljna analiza bi morala da obuhvati različite vrednosti ulaznih parametara za svaku

korišćenu metodu. Algoritmi za rešavanje problema optimizacije svakodnevno napreduju, kao i dostupni računarski resursi, pa se odnos efikasnosti različitih metoda stalno menja. Uz to, efikasnost zavisi i od veličine problema, karakteristika nezavisno promenljivih veličina itd, pa bi mogućnosti za generalizaciju bile veoma ograničene. Poređenje metoda koje su korišćene ovde, uz još dve — optimizaciju kolonijom mrava i harmonijsku pretragu — primenjenih na sličnom, ali manjem primeru dato je u radu [99].

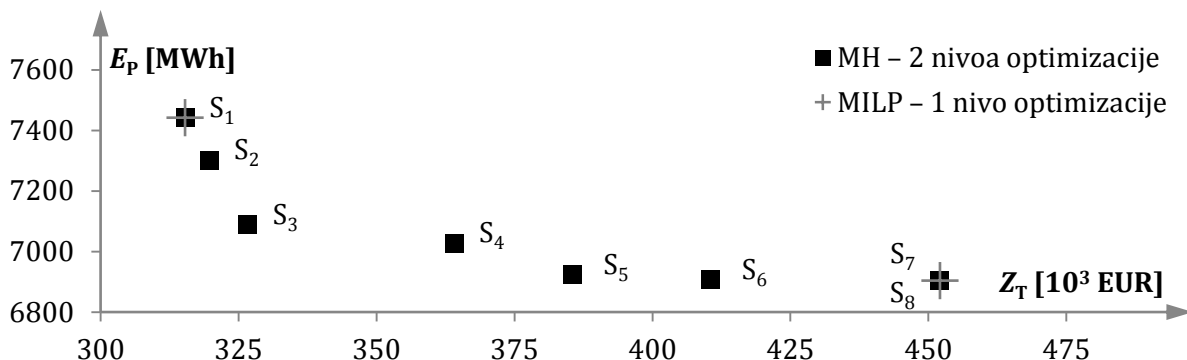
Ono što je sigurno jeste da se razmatrani problem rešava znatno brže korišćenjem strukturne dekompozicije — u roku od 1–8 h — zavisno od metode, izabranih parametara optimizacionog algoritma, softvera za mešovito celobrojno linearno programiranje, korišćenog računara itd, dok je pristupu na bazi nadstrukture postrojenja potrebno više od 36 h sa dobrim početnim rešenjem i znatno više bez početnog rešenja. Ovaj odnos se ne može generalizovati jer značajno zavisi od veličine problema i još mnogo uticajnih faktora, ali uglavnom povećanje broja diskretnih nezavisno promenljivih veličina menja odnos u korist prvog, a smanjenje u korist drugog pristupa.

### **5.1.3. Višekriterijumska optimizacija**

#### *5.1.3.1. Optimalna rešenja*

Višekriterijumska optimizacija je vršena metodom  $\varepsilon$ -ograničenja. Razmatrana su dva problema optimizacije sa po dve funkcije cilja: (1)  $Z_T$  i  $E_p$ , kao i (2)  $Z_T$  i  $m_{GHG}$ . Dobijena Pareto optimalna rešenja su prikazana na slikama 5.4 i 5.5, a odgovarajući detalji su dati u tabeli 5.2. Moguće je da postoji još ovakvih rešenja jer, kada se koristi metoda  $\varepsilon$ -ograničenja, broj pronađenih Pareto optimalnih tačaka zavisi od rezolucije promene ograničenja koje se odnosi na funkciju cilja. Ipak, dobijena rešenja su sasvim dovoljna za donošenje zaključaka u vezi sa rezultatima višekriterijumske optimizacije.

Funkcija cilja optimizacije radnih parametara su varijabilni troškovi, osim za rešenja  $S_8$  i  $S_{15}$  koja redom odgovaraju problemima minimizacije potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte na oba nivoa, bez pretpostavke rada u finansijski optimalnom režimu. Ova dva rešenja, kao i rešenje  $S_1$ , odgovaraju problemima optimizacije sa samo jednim nivoom. Važno je ponovo naglasiti da su ista rešenja —  $S_1$ ,  $S_8$  i  $S_{15}$  — dobijena korišćenjem dva potpuno različita pristupa: (1) strukturnom dekompozicijom i kombinovanjem metaheurističkih metoda sa mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem i (2) redukcijom nadstrukture sistema pomoću mešovitog celobrojnog linearnog programiranja. S obzirom da je drugi pristup u širokoj upotrebi i da daje tačne rezultate, pokazano je da su, u ovom slučaju, tačni rezultati dobijeni i strukturnom dekompozicijom.



**Slika 5.4.** Pareto optimalna rešenja dobijena metodom  $\varepsilon$ -ograničenja, primenom strukturne dekompozicije i metaheurističkih metoda (MH), kao i pristupa na bazi nadstrukture i mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (MILP), kada su funkcije cilja ukupni godišnji troškovi i godišnja potrošnja primarne energije



**Slika 5.5.** Pareto optimalna rešenja dobijena metodom  $\varepsilon$ -ograničenja, primenom strukturne dekompozicije i metaheurističkih metoda (MH), kao i pristupa na bazi nadstrukture i mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (MILP), kada su funkcije cilja ukupni godišnji troškovi i godišnja emisija gasova sa efektom staklene bašte

Ostala rešenja su dobijena rešavanjem problema optimizacije sa dva nivoa, pa je korišćena samo strukturna dekompozicija. Posebno je zanimljivo poređenje rešenja S<sub>7</sub> i S<sub>8</sub>, kao i S<sub>14</sub> i S<sub>15</sub>. Rešenje S<sub>7</sub> odgovara funkciji cilja  $E_P$  na strukturnom i projektnom, odnosno  $Z_V$  na radnom nivou. Rešenje S<sub>8</sub>, kao što je rečeno odgovara minimalnoj vrednosti  $E_P$  na oba nivoa. Iz tabele 5.2 se vidi da S<sub>7</sub> ima nižu vrednost  $Z_T$ , dok je kod S<sub>8</sub> manje  $E_P$ , što odgovara izboru funkcija cilja. Razlike su male jer se za zadatu strukturu postrojenja i projektne parametre, radni režimi malo razlikuju za dve korišćene funkcije cilja. Ova konstatacija važi za zadate ulazne parametre — cene energenata i faktore konverzije energije goriva i električne energije u primarnu energiju. Takođe se može uočiti da rešenje S<sub>14</sub>, koje odgovara funkciji cilja  $m_{GHG}$  na strukturnom i projektnom, tj.  $Z_V$  na radnom nivou, ima nižu vrednost  $Z_T$  i višu vrednost  $m_{GHG}$  od rešenja S<sub>15</sub>. To je takođe posledica izbora funkcija cilja.

**Tabela 5.2.** Pareto optimalna rešenja optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara sistema za snabdevanje energijom

Rešenje		Vrednosti funkcija cilja		
Oznaka	Vrednost $\gamma$	$Z_T$	$E_P$	$m_{GHG}$
–	–	[ $10^3$ EUR]	[MWh]	[t CO <sub>2</sub> e]
S <sub>1</sub>	(1, 0, 2, 1, 0, 4, 0, 4, 2, 1)	315,310	7441,93	1861,19
S <sub>2</sub>	(2, 0, 1, 3, 0, 4, 0, 4, 2, 1)	319,699	7301,24	1777,39
S <sub>3</sub>	(3, 0, 1, 3, 0, 4, 0, 4, 2, 1)	326,586	7088,64	1736,99
S <sub>4</sub>	(4, 0, 0, 3, 0, 4, 0, 4, 2, 1)	364,134	7027,62	1616,22
S <sub>5</sub>	(4, 0, 1, 4, 1, 3, 2, 0, 2, 2)	385,519	6922,95	1617,66
S <sub>6</sub>	(4, 1, 1, 4, 1, 2, 2, 1, 2, 1)	410,611	6907,20	1618,34
S <sub>7</sub>	(4, 1, 1, 4, 4, 3, 2, 0, 2, 2)	452,005	6905,23	1618,33
S <sub>8</sub>	(4, 1, 1, 4, 4, 2, 2, 3, 2, 2)	452,138	6903,85	1623,49
S <sub>9</sub>	(2, 0, 1, 2, 0, 4, 0, 4, 2, 1)	319,364	7331,37	1786,57
S <sub>10</sub>	(4, 0, 1, 0, 4, 1, 0, 3, 2, 2)	426,045	7672,95	1254,61
S <sub>11</sub>	(4, 2, 0, 0, 0, 4, 2, 0, 2, 2)	492,035	8363,78	1184,08
S <sub>12</sub>	(4, 2, 0, 0, 1, 3, 2, 0, 2, 2)	497,904	8357,57	1182,85
S <sub>13</sub>	(4, 2, 0, 0, 4, 1, 0, 3, 2, 2)	518,897	8459,34	1081,94
S <sub>14</sub>	(4, 4, 0, 0, 4, 1, 0, 3, 2, 2)	577,345	8428,31	151,74
S <sub>15</sub>	(4, 4, 0, 0, 4, 2, 1, 4, 2, 2)	776,742	13111,05	-3732,67

Skupovi Pareto optimalnih rešenja sa slika 5.4 i 5.5, kao i iz tabele 5.2, prikazuju cenu smanjenja potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte, tj. razlike u troškovima između finansijski optimalnog rešenja S<sub>1</sub>, i ostalih, kod kojih su pri optimizaciji uzeti u obzir i drugi ciljevi. Izbor rešenja koje predstavlja odabrane parametre postrojenja je stvar kompromisa i vrednovanja različitih ciljeva. Na primer, sa slike 5.4 se može zaključiti da bi rešenje S<sub>5</sub> moglo biti bolji kompromis između isplativosti i efikasnosti od S<sub>6</sub>, S<sub>7</sub> ili S<sub>8</sub> jer su razlike u troškovima značajne, dok su odgovarajuće količine utrošene primarne energije skoro jednake. Analiza kvaliteta kompromisa i relativnog značaja indikatora je stvar percepcije i ciljeva zainteresovanih strana i donosioca odluka, pa je kao takva izvan opsega ove disertacije. Kao što je sugerisano, upotreba fazi logike i skupova prilikom definisanja funkcija cilja može biti od koristi kod višekriterijumske optimizacije.

Fazi programiranje je pogodno u slučajevima kada ima više od dve funkcije cilja. Tada je takođe je moguće kao rezultat dobiti skup Pareto optimalnih rešenja. Ovde su prikazana dva primera korišćenja fazi programiranja:

- (1) Definisane su tri funkcije cilja:  $Z_T$ ,  $E_P$  i  $m_{GHG}$ , kao i tri odgovarajuće linearne funkcije

pripadnosti prema jednačini (3.126). Idealne i anti-idealne vrednosti odgovaraju ekstremnim Pareto optimalnim rešenjima problema optimizacije sa dve funkcije cilja:  $S_1$ ,  $S_7$  i  $S_{14}$ . Fazi funkcija cilja je najveće moguće zadovoljenje sva tri kriterijuma, odnosno maksimizacija minimalne funkcije pripadnosti, definisana jednačinom (3.127). Dobijeno optimalno rešenje je  $S_{10}$ , a vrednost zajedničke funkcije pripadnosti — funkcije cilja — 0,3548.

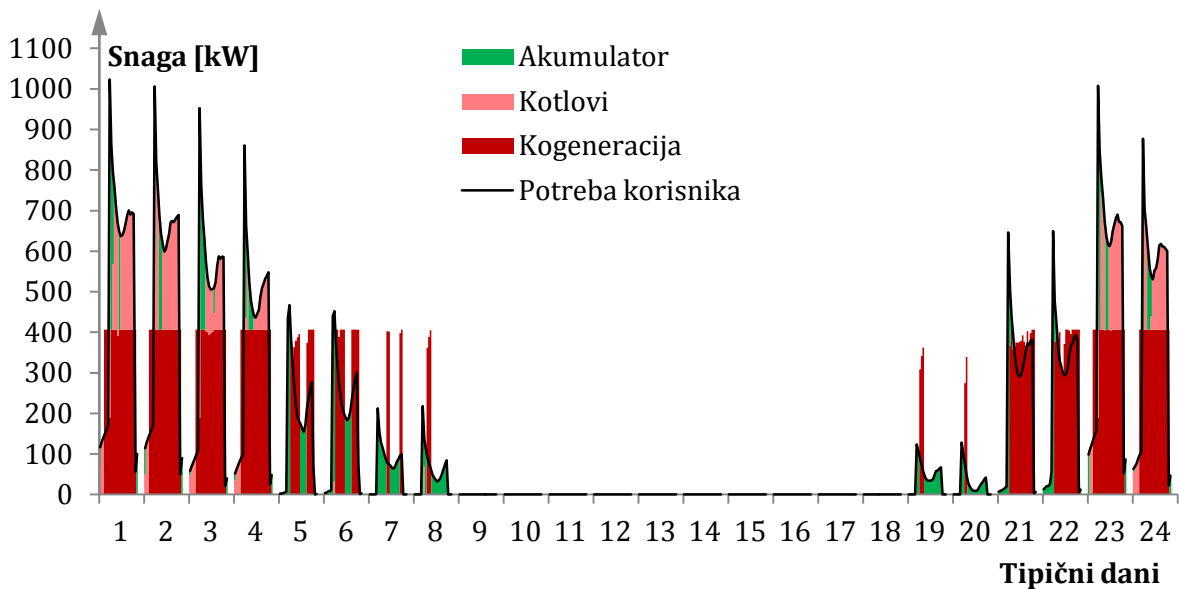
- (2) Ukoliko bi, npr. bilo korisno ograničiti skup izvodljivih rešenja samo na ona kod kojih je  $Z_T \leq 400000$  EUR, dobilo bi se nešto drugačije rešenje sa manjom vrednošću funkcije cilja. To se postiže dodavanjem odgovarajućeg  $\alpha$ -preseka fazi skupu izvodljivih rešenja. Drugim rečima, funkcija pripadnosti koja odgovara funkciji cilja  $Z_T$  je jednaka 0 ako je  $Z_T \geq 400000$  EUR. Novo rešenje je  $\gamma = (4, 0, 0, 1, 1, 3, 2, 0, 2, 2)$  i ima funkciju cilja 0,2961.

Iz tabele 5.2 se može izvući nekoliko zaključaka vezanih za same strukture postrojenja, tj. projektne parametre. Naime, prema prikazanim rezultatima se vidi da kod rešenja koja su bliža finansijski optimalnim, upotreba apsorpcionih rashladnih mašina nije isplativa. Sa približavanjem rešenjima pogodnim sa aspekta potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte, postaju poželjniji motori većih snaga, a ponekad i apsorpciono hlađenje. Takođe se može primetiti da finansijski atraktivnija rešenja imaju samo po jednu kogenerativnu jedinicu. Razlog tome je činjenica da je za dve manje jedinice potrebna veća investicija nego za jednu većeg kapaciteta. Uz to, motori većih snaga su često efikasniji. Fleksibilnost u radu, koja je jedna od glavnih prednosti rešenja sa više jedinica, kompenzuje se korišćenjem akumulatora energije. Kod rešenja koja imaju jednu veću i jednu manju kogenerativnu jedinicu, gotovo nikada ne rade obe istovremeno, već se jedinica većeg kapaciteta koristi kada su opterećenja veća i obrnuto. Ova rešenja nisu finansijski povoljna. Rešenja sa po dva motora najvećeg ponuđenog kapaciteta,  $S_{14}$  i  $S_{15}$ , su još manje finansijski atraktivna i rezultat su problema optimizacije koji ne uzimaju u obzir finansije prilikom određivanja strukture i projektnih parametara.

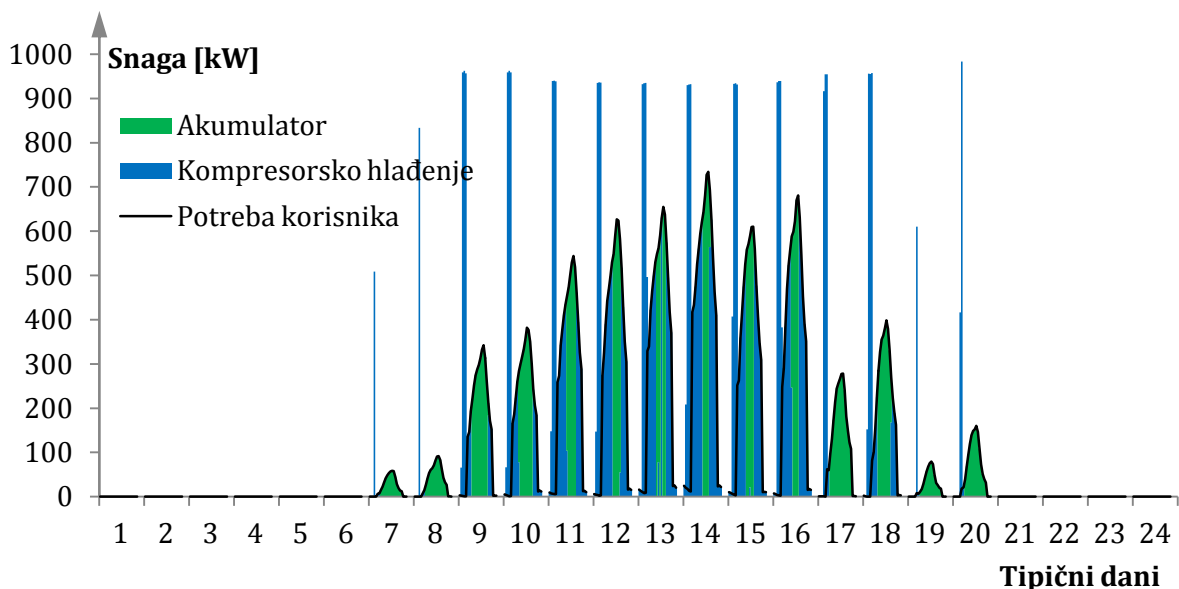
### *5.1.3.2. Radni režimi sistema za snabdevanje energijom*

Optimalni režimi rada sistema za snabdevanje energijom zavise od funkcije cilja optimizacije radnih parametara, ulaznih veličina, kao i zadate strukture postrojenja i projektnih parametara komponenata. Generalno, odnosi koeficijenata funkcija cilja — cena i koeficijenata konverzije  $\varphi$  i  $\psi$  — za gorivo i električnu energiju značajno utiču na radne režime i uzrokuju zavisnosti optimalnih režima rada od funkcija cilja.

Na slikama 5.6 i 5.7 su prikazani optimalni radni parametri za rešenje  $S_1$ . Kod ovog rešenja nema proizvodnje viška korisne toplotne energije koji se mora odvesti u okolinu, već se



**Slika 5.6.** Finansijski optimalno zadovoljenje potrebe korisnika za grejanjem



**Slika 5.7.** Finansijski optimalno zadovoljenje potrebe korisnika za hlađenjem

proizvodi onoliko koliko je potrebno za rad sistema. Višak toplotne energije se skladišti u toplom akumulatoru i kasnije koristi. Kotlovi služe za pokrivanje vršnih opterećenja. Zbog niske cene električne energije koja se preuzima iz mreže u noćnoj tarifi, rad motora u tom periodu je uglavnom neisplativ. Tokom toplijih meseci, za zadovoljenje potreba korisnika za grejanjem tokom noći se uglavnom koristi akumulator, a tokom hladnijih kotlovi jer akumulator služi za pokrivanje jutarnjih vršnih opterećenja. Motor uglavnom radi sa maksimalnim opterećenjem. Leti, kompresorska rashladna mašina radi uglavnom

tokom noći kada je cena električne energije niska, a koeficijent hlađenja viši zbog nižih spoljašnjih temperatura. Medijum u hladnom akumulatoru se priprema i koristi tokom dana za zadovoljenje potreba korisnika za hlađenjem. Rashladna mašina radi tokom perioda kada je električna energija skuplja samo ako kapacitet hladnog akumulatora nije dovoljan da skladišti energiju potrebnu za ceo dan.

Ukoliko je potrošnja primarne energije funkcija cilja problema optimizacije radnih parametara, radni režimi se ne razlikuju mnogo od finansijski optimalnih režima. Osnovna razlika je u tome što motor radi i tokom noći ukoliko je potrebno jer je pretpostavljeno da je faktor konverzije  $\varphi_e$  konstantan, za razliku od cene preuzete električne energije.

Kada je funkcija cilja emisija gasova sa efektom staklene bašte, situacija je potpuno drugačija. Odnos  $\psi_e/\psi_f$  je znatno veći od  $\varphi_e/\varphi_f$ , pa je uticaj kogeneracije pozitivan kada se mreži isporučuje električna energija čak i kada se korisna toplotna energija odbacuje. Zbog toga optimalni radni režimi podrazumevaju rad motora bez prestanka i odbacivanje viška toplotne energije. Takvi uslovi su pogodni za korišćenje apsorpcionih rashladnih mašina tokom sezone hlađenja. Ukoliko su kapaciteti kogenerativnih jedinica dovoljno veliki, nije potrebno skladištiti energiju, pa je ugradnja toplih akumulatora neisplativa.

Pristup optimizaciji radnih parametara na bazi tipičnih dana ima jedno važno ograničenje — ne mogu se uzeti u obzir efekti dugoročnijeg skladištenja energije, a posledično ni vrednovati koristi od akumulatora većih kapaciteta sa npr. nedeljnim ili sezonskim ciklusima punjenja i pražnjenja. To se donekle može izbeći korišćenjem tipičnih nedelja umesto tipičnih dana i sl.

### *5.1.3.3. Mogućnosti smanjenja potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte*

Za procenu smanjenja potrošnje primarne energije ili emisije gasova sa efektom staklene bašte, neophodno je definisati tzv. referentni scenario, tj. alternativni slučaj sa kojim se rezultati porede. Pored strukture, projektnih i radnih parametara, cena i faktora konverzije, referentni scenario ima veliki uticaj na rezultate. U nekim slučajevima — npr. ukoliko je referentni scenario definisan tako da dominiraju energetske efikasne tehnologije i obnovljivi izvori energije — trigeneracija koja se zasniva na sagorevanju prirodnog gasa može rezultirati povećanjem potrošnje primarne energije i posebno emisije gasova sa efektom staklene bašte. To se ne odnosi na akumulatore toplotne energije.

Pretpostavimo da se rešenja problema optimizacije porede sa slučajem u kome se korisnici snabdevaju električnom energijom iz elektrodistributivne mreže, toplotnom energijom iz kotlova stepena korisnosti  $\eta_{t,Ref} = 0,8$ , a hlađenje se obezbeđuje kompresorskim

mašinama koeficijenta hlađenja  $COP_{r,Ref} = 3$ . Tada će potrošnja primarne energije u referentnom slučaju biti 8736,28 MWh, a emisija gasova sa efektom staklene bašte 2264,66 t CO<sub>2</sub>e. Rešenju S<sub>1</sub> će odgovarati godišnje smanjenje potrošnje primarne energije od 1294,35 MWh, a rešenju S<sub>7</sub> 1831,05 MWh. Godišnje smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte za rešenje S<sub>1</sub> bi bilo 403,47 t CO<sub>2</sub>e, a za S<sub>14</sub> 2112,92 t CO<sub>2</sub>e. Rešenje S<sub>15</sub> bi dovelo do porasta potrošnje primarne energije.

Za vrednosti  $\eta_{t,Ref} = 0,9$  i  $COP_{r,Ref} = 4$ , u referentnom slučaju potrošnja primarne energije je 8229,51 MWh, a emisija gasova sa efektom staklene bašte 2164,97 t CO<sub>2</sub>e. Smanjenje potrošnje primarne energije za Pareto optimalna rešenja se kreće od 787,58 MWh, za rešenje S<sub>1</sub>, do 1324,28 MWh, za S<sub>7</sub>. Smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte je u granicama od 303,78 t CO<sub>2</sub>e do 2013,23 t CO<sub>2</sub>e, koje redom odgovaraju rešenjima S<sub>1</sub> i S<sub>14</sub>. Rešenja S<sub>11</sub>–S<sub>15</sub> bi rezultirala povećanom potrošnjom primarne energije.

Relativne razlike potrošnje primarne energije u posmatranom i referentnom scenariju se često koriste kao indikatori efikasnosti sistema sa kogeneracijom [3, 15, 16]. Chicco i Mancarella [28] su definisali sličan indikator za opštiji slučaj — sistem sa trigeneracijom.

Ušteda primarne energije sistema trigeneracije za rešenje S<sub>1</sub>, prema pristupu iz [28], je 27,28 % ako su referentne vrednosti:  $\eta_{e,Ref} = 0,4$  za električni stepen korisnosti (što odgovara vrednosti  $\varphi_e = 2,5$  kWh/kWh),  $\eta_{t,Ref} = 0,8$  za toplotni stepen korisnosti i  $COP_{r,Ref} = 3$  za koeficijent hlađenja. Ušteda primarne energije za najbliži razmatrani slučaj iz [28] je 21,6 %. Za referentne vrednosti:  $\eta_{e,Ref} = 0,4$ ,  $\eta_{t,Ref} = 0,9$  i  $COP_{r,Ref} = 4$ , ušteda primarne energije za slučaj S<sub>1</sub> je 18,8 %, a za najbliži slučaj iz [28] je 16,1 %. Rešenje S<sub>1</sub> i posmatrani slučaj iz [28] nisu identični, ali su uporedivi. Najviše se razlikuju u koeficijentima hlađenja, potražnji energije i donekle u režimima rada.

#### **5.1.4. Analiza osetljivosti**

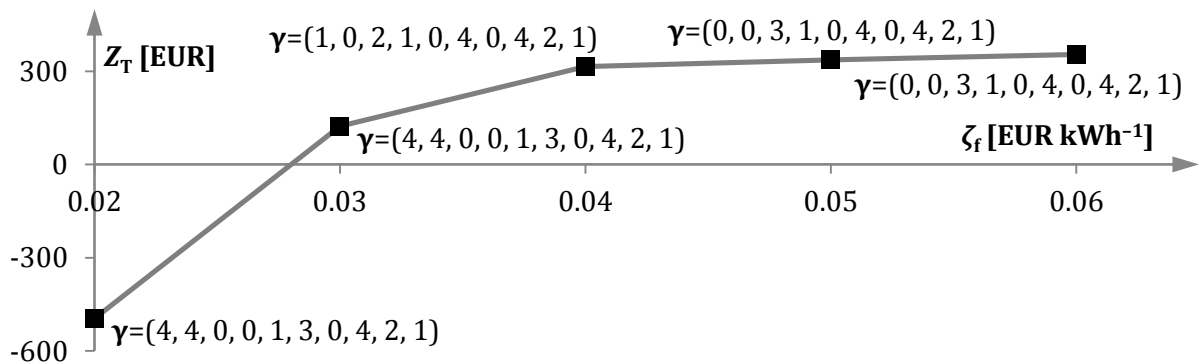
Cene energenata su veoma važne za isplativost implementacije sistema kogeneracije i trigeneracije i mogu služiti kao instrument energetske politike za podsticanje izgradnje energetski efikasnih i ekološki prihvatljivijih postrojenja. Pored optimalne strukture postrojenja i izbora komponenata, promena cena se manifestuje i drugačijim režimima rada. Sve ovo za posledicu može imati značajne promene energetske efikasnosti i uticaja na okolinu sistema za snabdevanje energijom.

Analiza osetljivosti ukupnih godišnjih troškova na cene goriva, preuzete i isporučene električne energije, kao i posledični uticaj na potrošnju primarne energije i emisiju gasova sa efektom staklene bašte su prikazani u nastavku. Optimalna struktura postrojenja, projektni i radni parametri odgovaraju finansijskim funkcijama cilja Z<sub>T</sub> i

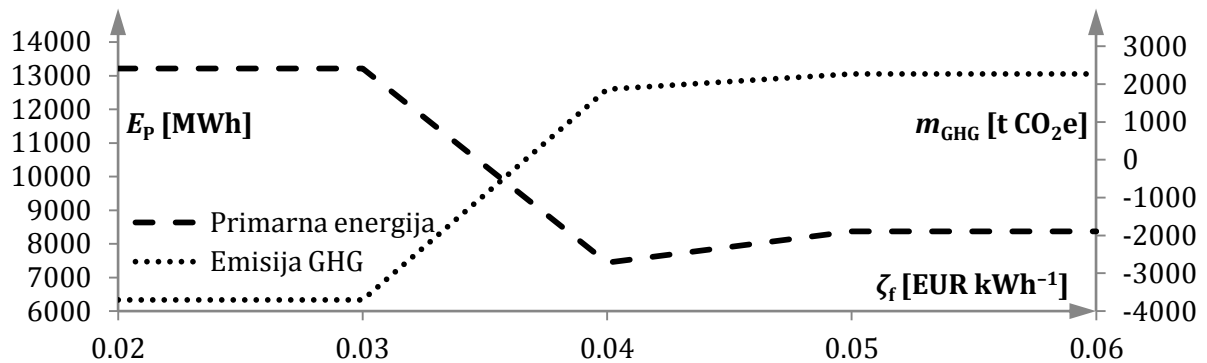
$Z_V$ . Cena prirodnog gasa je izražena na osnovu donje toplotne moći, dok se navedene cene električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže odnose na višu tarifu. Odgovarajuće cene u nižoj tarifi su četiri puta manje.

#### 5.1.4.1. Cena goriva

Niske cene goriva, do oko 0,03 EUR/kWh, pogoduju radu kogenerativnih jedinica sa punim kapacitetom tokom cele godine, nezavisno od mogućnosti iskorišćenja toplotne energije, pa je isplativo implementirati što veći kapacitet za kogeneraciju, što se vidi na slici 5.8. Radni režimi se odlikuju velikom količinom električne energije isporučene mreži i značajnom količinom odbačene toplotne energije. Toplotni kapacitet motora je dovoljno veliki, pa nije potrebna ugradnja kotlova niti toplih akumulatora energije. To takođe čini isplativim apsorpciono hlađenje. Na slici 5.9 se može videti da je u ovom slučaju potrošnja primarne energije visoka, a emisija gasova sa efektom staklene bašte niska, što je u skladu sa rezultatima višekriterijumske optimizacije.



**Slika 5.8.** Zavisnost optimalne strukture i projektnih parametara postrojenja, kao i ukupnih godišnjih troškova od cene goriva



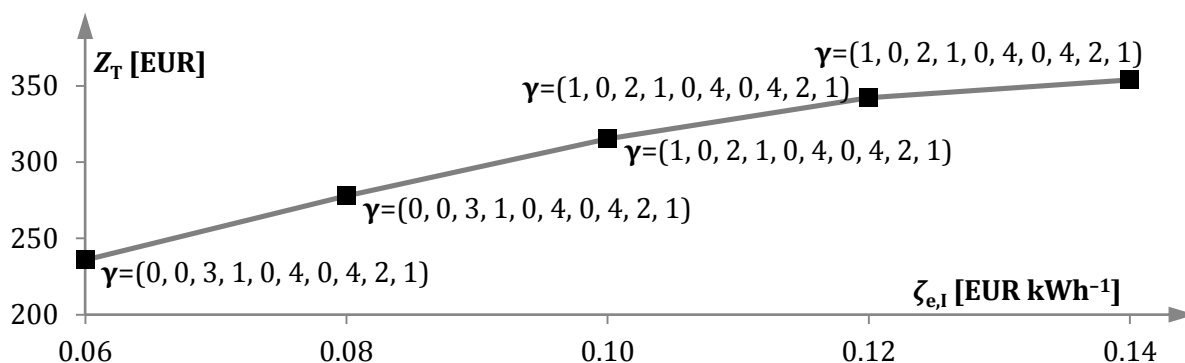
**Slika 5.9.** Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG) od cene goriva

Sa porastom cene prirodnog gasa na 0,04 EUR/kWh, optimalno rešenje postaje  $S_1$  iz tabele 5.2. Nema rada motora bez prestanka i odbacivanja korisne toplotne energije u okolinu, pa se smanjuje potrošnja primarne energije i povećava emisija gasova sa efektom staklene bašte. U optimalnom rešenju više nema apsorpcione rashladne mašine, pa se povećava optimalni kapacitet kompresorske mašine.

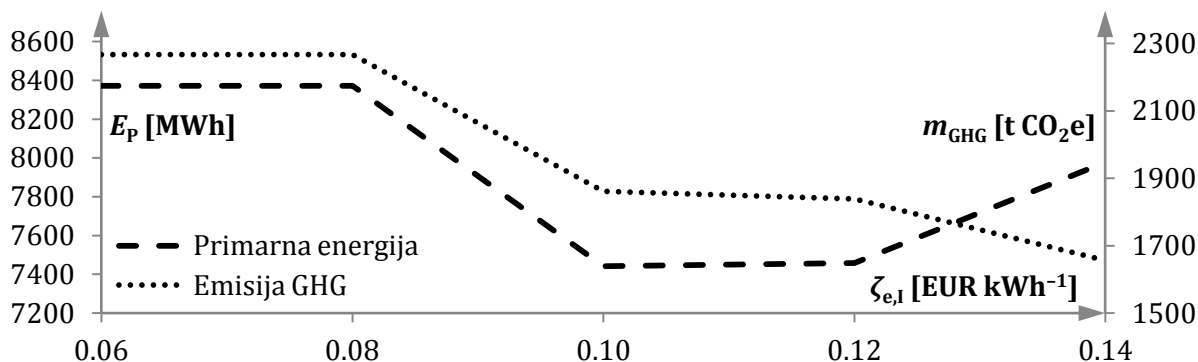
Dalji porast cena goriva čini kogeneraciju neisplativom opcijom, što uzrokuje porast potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte.

#### 5.1.4.2. Cena preuzete električne energije

Sa cenama električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže do 0,08 EUR/kWh, kogeneracija nije isplativa, već je optimalno rešenje sa tri kotla i jednom kompresorskom rashladnom mašinom, što se može videti sa slike 5.10. Sistem se električnom energijom snabdeva iz mreže. Sa slike 5.11 se vidi da su odgovarajuće vrednosti potrošnje primarne



Slika 5.10. Zavisnost optimalne strukture i projektnih parametara postrojenja, kao i ukupnih godišnjih troškova od cene preuzete električne energije



Slika 5.11. Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG) od cene preuzete električne energije

energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte tada visoke.

Povećanjem cene električne energije do 0,14 EUR/kWh, dobijaju se rešenja čiji optimalni strukturni i projektni parametri odgovaraju rešenju  $S_1$ . U ovom opsegu cena apsorpciono hlađenje nije isplativo. Do vrednosti oko 0,12 EUR/kWh, radni režimi odgovaraju rešenju  $S_1$ , pa potrošnja primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte opadaju.

Sa cenom od 0,14 EUR/kWh potrošnja primarne energije počinje da raste, a emisija gasova sa efektom staklene bašte naglo opada. To je posledica promene radnog režima. Zbog visoke cene, veoma mala količina električne energije se preuzima iz mreže, pa motori moraju da proizvode više električne, a samim tim i toplotne energije. Motori rade i leti iako nema apsorpcionog hlađenja. Značajna količina korisne toplotne energije se izbacuje u okolinu, jer je to finansijski povoljnije od kupovine električne energije iz mreže.

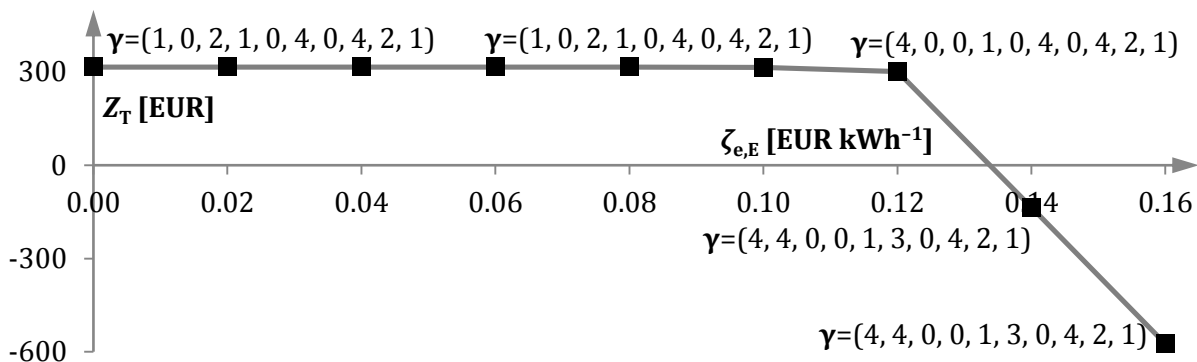
#### *5.1.4.3. Cena isporučene električne energije*

Do vrednosti cene električne energije predate elektrodistributivnoj mreži oko 0,06 EUR/kWh, optimalno rešenje po strukturi i odabranim komponentama odgovara  $S_1$ , kao što je prikazano na slici 5.12, ali nema proizvodnje električne energije za prodaju mreži. Nema odbacivanja korisne toplotne energije u okolinu. Potrošnja primarne energije je relativno niska, što se vidi na slici 5.13.

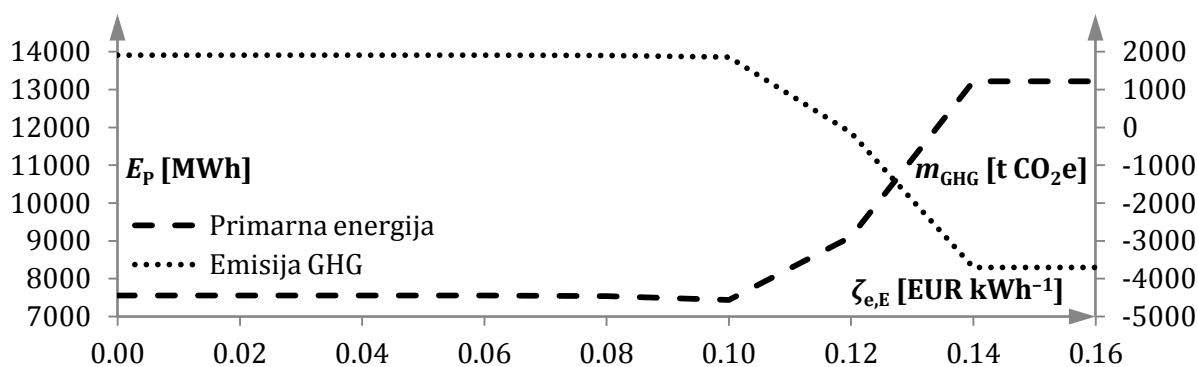
Porastom cene isporučene električne energije, povećava se količina koja se proda, a time i količina proizvedene toplotne energije. I dalje nema odbacivanja viška toplotne energije u okolinu. Potrošnja primarne energije i emisija gasova sa efektom staklene bašte blago opadaju. Strukturni i projektni parametri koji odgovaraju rešenju  $S_1$  ostaju optimalni do vrednosti 0,10 EUR/kWh.

Sa promenom cene od 0,12 EUR/kWh naviše, povećava se količina isporučene električne energije, a time i finansijska atraktivnost jedinica za kogeneraciju većih snaga. Za cenu 0,12 EUR/kWh, optimalno rešenje i dalje sadrži jedan motor i nema apsorpcionih rashladnih mašina, a optimalni radni režim podrazumeva rad motora sa punim kapacitetom, pre svega u periodima kada je preuzeta električna energija skuplja. Tokom perioda niže tarife za preuzetu električnu energiju, uglavnom nema kogeneracije, posebno leti. Velika količina toplotne energije se odbacuje u okolinu. Za cenu od 0,14 EUR/kWh i više, optimalan režim rada podrazumeva neprekidan rad motora sa punim kapacitetom. Optimalno rešenje ima najveći mogući kapacitet kogenerativnih jedinica i apsorpcionu rashladnu mašinu, dok akumulator toplotne energije nije potreban.

U opsegu cena 0,10–0,14 EUR/kWh, potrošnja primarne energije raste, a emisija gasova



Slika 5.12. Zavisnost optimalne strukture i projektnih parametara postrojenja, kao i ukupnih godišnjih troškova od cene isporučene električne energije



Slika 5.13. Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG) od cene isporučene električne energije

sa efektom staklene bašte opada, dok se daljim povećanjem cene ne menjaju strukturni, projektni i radni parametri, pa ni izlazne veličine.

### 5.1.5. Optimizacija kao sredstvo definisanja energetske politike

Kao što je pokazano, cene energenata mogu značajno uticati na isplativost, a time i na prihvatljivost ugradnje energetskih sistema sa kogeneracijom i trigeneracijom, kao i njihove radne parametre. To uslovljava i vrednosti energetskih i ekoloških indikatora. Cene energenata — prirodnog gasa i električne energije — najčešće nisu u potpunosti formirane na osnovu tržišnih pravila. Mogućnosti uticaja država na isplativost kogeneracije i trigeneracije regulacijom cena energenata i uopšte energetskom politikom su velike.

Država, tj. telo koje definiše energetska politiku i prateće zakone, teško može uticati na težnju investitora za što boljim finansijskim rezultatima, posebno ukoliko se radi o privatnim kompanijama. Matematički govoreći, država teško može da investitoru nametne

funkciju cilja kada on odlučuje o svojim ulaganjima ili planira način rada postojećeg energetskeg sistema. Ono čime država, tj. zakonodavac može da obaveže nekoga jesu pravila, tj. ograničenja, kao i delimično cene energenata — ulazni parametri. Kada investitor optimizuje postrojenje ili njegov rad sa ciljem maksimalnog profita, on uzima u obzir nametnuta ograničenja. Takva ograničenja su npr. ušteda primarne energije iznad 0 ili 10 % (zavisno od snage postrojenja), prema evropskim direktivama [15, 16], ili tzv. „ukupni“ stepen korisnosti iznad 85 % u Republici Srbiji [19].

Dodavanje ili pooštavanje ograničenja u problemu optimizacije uvek rezultira nepromenjenom ili lošijom vrednošću funkcije cilja. Važi i obrnuto: relaksacija problema optimizacije ima za posledicu istu ili bolju vrednost funkcije cilja. To se može primeniti na proces donošenja odluka u energetskeg sektoru. Naime, ukoliko se energetskeg politikom ili pratećim pravnim aktima insistira na suviše strogim ograničenjima, npr. u pogledu efikasnosti ili uticaja na okolinu, veća je verovatnoća da će investitor ulaganje u novi sistem smatrati neisplativim. Kao posledica može izostati izgradnja postrojenja sa kogeneracijom ili trigeneracijom ili doći do implementacije sistema manjeg kapaciteta.

Insistiranje na jednom od ciljeva za koje je zainteresovan zakonodavac može biti negativno sa drugog aspekta. Na primer, prekomerno podsticanje smanjenja emisije sa efektom staklene bašte se može negativno odraziti na potrošnju primarne energije, kao što se vidi iz tabele 5.2. Drugi primer je drastičniji: prekomernim ograničenjem tzv. „ukupnog“ stepena korisnosti se može smanjiti atraktivnost izgradnje ili korišćenja sistema sa kogeneracijom. U nekim slučajevima se može podsticati rad motora sa parcijalnim (umesto punim) opterećenjem ako su tada veći toplotni i „ukupni“, a manji električni stepen korisnosti. Tako se ograničenjem jednog indikatora efikasnosti vrednost drugog indikatora energetske efikasnosti može pogoršati, kao i isplativost postrojenja i uticaj na okolinu. Relevantnost „ukupnog“ stepena korisnosti kao indikatora za ocenu efikasnosti sistema kogeneracije, pre svega sa termodinamičkog aspekta je već diskutovana.

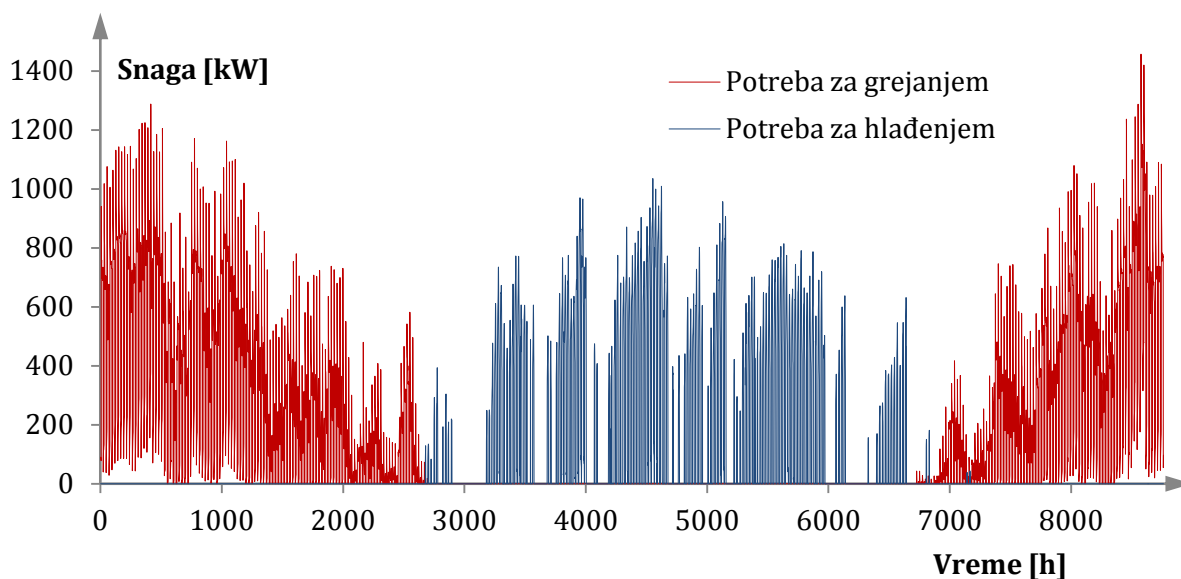
Višekriterijumska optimizacija energetskeg sistema sa dva ili više nivoa je izuzetno pogodna kao sredstvo energetske politike i strateškog odlučivanja u ovoj oblasti. Ona dozvoljava da se na različitim nivoima definišu različiti ciljevi, kao i da ograničenja na višim nivoima ne utiču direktno na optimalne parametre na nižim nivoima. Na višim nivoima, u funkcije cilja mogu biti implementirani parametri za čije vrednosti je zainteresovan onaj koji propisuje pravila — država. Na najnižem nivou — gde se određuju optimalni radni režimi — kao funkciju cilja je najčešće logično definisati minimalne varijabilne troškove ili maksimalni operativni profit. Prikazana analiza bi mogla biti deo procesa strateškog odlučivanja o visinama podsticajnih cena električne energije ili prirodnog gasa za kogeneraciju. Detaljnija varijanta ovakve analize bi se mogla ponoviti za više različitih, karakterističnih, tipova postrojenja i potrošača, a dobijeni rezultati analizirati zajedno.

## 5.2. Primer 2 — Optimizacija radnog režima

Pristup optimizaciji radnih režima sistema za snabdevanje energijom na bazi pokretnog perioda optimizacije ilustrovan je na primeru istog naselja kao i u slučaju optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara. Problem optimizacije je definisan kao problem mešovitog celobrojnog linearnog programiranja. Razmatrani period je jedna, tipična meteorološka godina. Vremenski korak je 1 h. Komponente matematičkog modela koje se odnose na sistem za hlađenje i zadovoljenje potrebe za hlađenjem razmatraju se samo u letnjem i prelaznim periodima. Problem optimizacije za celu godinu ima 856198 ograničenja i 427224 nezavisno promenljivih veličina, sa pomoćnim. Nakon dodatnog sređivanja, ostaje 807980 ograničenja i 407975 nezavisno promenljivih veličina — 133158 kontinualnih i 274817 binarnih.

Potreba korisnika za električnom energijom je definisana na osnovu izmerenih podataka. Potrebe za grejanjem i hlađenjem su određene simulacijama koristeći softver EnergyPlus uz malu redukciju opterećenja — zanemarene su dobijene potrebe za hlađenjem pre 01. aprila i nakon 31. oktobra, kao i za grejanjem između 01. maja i 30. septembra. Takođe su zanemarene dobijene niske potrebe za hlađenjem, uglavnom u jutarnjim časovima, kada je spoljašnja temperatura ispod 22 °C, polazeći od pretpostavke da će to opterećenje moći da se neutrališe prirodnim provetravanjem. Ukupna godišnja potreba za električnom energijom je procenjena na oko 2255 MWh<sub>e</sub>, grejanjem na oko 1409 MWh<sub>t</sub>, a hlađenjem 729 MWh<sub>c</sub>. Potrebe za grejanjem i hlađenjem su ilustrovane na slici 5.14.

Struktura postrojenja i projektni parametri komponenata definisani su na osnovu rešenja



Slika 5.14. Potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem za period od jedne godine

problema optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara. Sistem za snabdevanje energijom ima: gasni motor za kogeneraciju električne snage  $315 \text{ kW}_e$  i toplotne snage  $405 \text{ kW}_t$ , dva kotla koja takođe koriste prirodni gas snage po  $490 \text{ kW}_t$ , kompresorsku rashladnu mašinu snage  $842 \text{ kW}_r$  i apsorpcionu mašinu nominalne snage  $380 \text{ kW}_r$ , topli akumulator energije kapaciteta  $80 \text{ t}$  i hladni kapaciteta  $400 \text{ t}$ , kao i dva rashladna tornja nominalnog kapaciteta po  $1000 \text{ kW}_r$ . Postrojenje je predimenzionisano u odnosu na finansijski optimalno iz prethodnog primera. ApSORPCIONA rashladna mašina je dodata zbog važnosti analize prihvatljivosti apsORPCIONOG hlađenja, a veći kapacitet rashladnih tornjeva je posledica uključivanja ove rashladne mašine. Veći akumulatori energije su predviđeni jer je ovim pristupom moguće uzeti u obzir efekte skladištenja energije dugoročnije od dnevnih — npr. nedeljne cikluse punjenja i pražnjenja.

Rezultati za različite funkcije cilja i periode optimizacije prikazani su u tabeli 5.3. Period od  $8760 \text{ h}$  se odnosi na jedinstveni postupak optimizacije za celu godinu, bez skraćivanja i pomeranja perioda optimizacije. Za ovakav postupak definisan je jedan veliki problem optimizacije čije je efikasno rešavanje posledica tolerisanja malih grešaka i korišćenja početnih vrednosti binarnih nezavisno promenljivih veličina dobijenih optimizacijom na bazi pokretnog perioda optimizacije. Optimizacija sa pokretnim periodom je, osim za nalaženje početnih vrednosti, korišćena i za dobijanje konačnih rešenja. Tada je period kratkoročne optimizacije prikazan u tabeli 5.3 kao suma početnog i dodatnog perioda.

**Tabela 5.3.** Rezime parametara procedure i rezultata optimizacije radnog režima

Parametri procedure optimizacije			Rezultati optimizacije rada — 1 godina			
Period opt. [h]	Tol. greške [-]	Funkcija cilja —	$Z_V$ [ $10^3 \text{ EUR}$ ]	$E_P$ [MWh]	$m_{\text{GHG}}$ [t $\text{CO}_2\text{e}$ ]	Vreme [hh:mm:ss]
8760	0,5 %	$Z_V$	250,088	7352,46	1833,07	00:31:09
120 + 120	0,2 %	$Z_V$	249,878	7347,72	1831,45	11:18:50
120 + 120	0,5 %	$Z_V$	250,145	7348,66	1831,81	00:10:13
24 + 72	0,1 %	$Z_V$	249,926	7350,05	1832,16	01:15:07
24 + 72	0,5 %	$Z_V$	250,255	7355,76	1834,26	00:09:10
24 + 24	0,0 %	$Z_V$	250,160	7353,78	1833,31	00:17:03
24 + 24	0,5 %	$Z_V$	250,473	7356,41	1834,23	00:03:14
8760	0,6 %	$E_P$	257,696	7285,45	1808,73	00:27:12
24 + 24	0,1 %	$E_P$	257,705	7285,72	1808,72	00:14:56
8760	0,7 %	$m_{\text{GHG}}$	328,753	8315,46	1481,09	00:33:12
24 + 24	0,1 %	$m_{\text{GHG}}$	328,756	8315,54	1481,14	00:21:55

### **5.2.1. Analiza preciznosti i efikasnosti**

Iz tabele 5.3 se može videti da vrednosti izlaznih parametara  $Z_V$ ,  $E_P$  i  $m_{\text{GHG}}$  veoma malo zavise od perioda optimizacije i tolerancije greške — razlike su manje od 1 %, ali značajnije zavise od izabrane funkcije cilja. Sa druge strane, vreme rešavanja problema značajno zavisi od perioda optimizacije i tolerancije greške — značajno se produžava sa povećanjem prvog i skraćuje sa povećanjem drugog.

Kod problema optimizacije radnih parametara sa dužim posmatranim periodom — i posledično većim dimenzijama — neophodno je tolerisati veću grešku kako bi se problem rešio dovoljno efikasno. Problemi kod kojih se zajedno posmatra svih 8760 vremenskih koraka imaju najveću dozvoljenu grešku. Oni su ovde rešeni relativno brzo i sa zadovoljavajućom tačnošću zahvaljujući korišćenju početnih vrednosti binarnih nezavisno promenljivih veličina dobijenih postupkom optimizacije sa pokretnim periodom sa glavnim delom perioda od 24 h, dodatnim delom od takođe 24 h i nultom tolerancijom greške.

Rezultati dobijeni pristupom sa pokretnim periodom optimizacije su gotovo podjednako dobri kao i kada se odjednom razmatra cela godina, u jednom slučaju čak i bolji. To pokazuje da je izbor perioda optimizacije, tolerancije greške, ali i nivoa detalja (što ovde nije razmatrano), stvar kompromisa između preciznosti i efikasnosti. Takođe treba naglasiti da su stvarne greške kod manjih problema optimizacije često daleko manje od dozvoljenih.

Rezultati iz tabele 5.3 takođe ilustruju značaj pristupa optimizaciji radnih režima korišćenjem pokretnog perioda optimizacije, kako za određivanje načina rada postrojenja sa fleksibilnim komponentama i bez sezonskog skladišta energije, tako i kao heurističke tehnike u funkciji rešavanja većeg problema optimizacije koji obuhvata celu godinu. Pokazano je da je, za ovakva postrojenja, aproksimacija nizom postupaka kratkoročne optimizacije za vremenske periode koji se preklapaju, a u cilju efikasnijeg rešavanja kompleksnih problema optimizacije opravdana.

Značaj ovog pristupa može biti još veći ukoliko se ne razmatra samo jedna godina već više njih, npr. čitav životni vek postrojenja [112].

Treba napomenuti i da ovaj pristup nije tako pogodan ukoliko u matematičkom modelu postoje ograničenja koja se odnose na duže vremenske intervale, npr. godišnje ograničenje raspoložive energije ili uticaja na životnu sredinu, kao ni u slučajevima sezonskog skladištenja energije.

### 5.2.2. Analiza kriterijuma optimizacije

Kriterijumi optimizacije, odnosno funkcije cilja prilikom optimizacije radnih režima posmatranog sistema za snabdevanje energijom su: varijabilni troškovi,  $Z_V$ , potrošnja primarne energije,  $E_P$ , kao i emisija gasova sa efektom staklene bašte,  $m_{\text{GHG}}$ . Funkcije cilja su definisane redom jednačinama (3.114), (3.116) i (3.117). Kao što je rečeno, najvažniji rezultati optimizacije su prikazani u tabeli 5.3.

U slučaju optimizacije sa finansijskom funkcijom cilja, za zadate ulazne parametre (energetske potrebe korisnika, cene energenata, konverziona faktore i stanje okolnog vazduha), optimalni način rada energetskog sistema se odlikuje korišćenjem kogeneracije za proizvodnju električne i toplotne energije samo u periodima kada postoji potreba za grejanjem. Motor radi uglavnom sa maksimalnim opterećenjem, pri čemu se višak proizvedene toplotne energije, ukoliko postoji, skladišti u toplom akumulatoru. Nema proizvodnje toplotne energije koja ne može biti iskorišćena, tj. mora biti odbačena u okolinu. Ukoliko se proizvede više električne energije od potreba korisnika i samog sistema, ona se predaje elektrodistributivnoj mreži, a u slučaju da nema dovoljno energije za korisnike i sistem, postoji mogućnost preuzimanja iz mreže. Čak i tokom najhladnijih dana, postoji određeni prekid rada motora tokom noći, kada se potrebna električna energija kupuje od distributera po niskoj ceni. Kotlovi se koriste samo tokom najhladnijeg dela godine, kada motor i topli akumulator ne mogu sami da zadovolje potrebe korisnika za grejanjem. Za hlađenje se koristi samo kompresorska mašina. Kompresorska rashladna mašina radi noću — kada su temperature vazduha niže, kao i cena električne energije — onoliko koliko to kapacitet hladnog akumulatora dozvoljava.

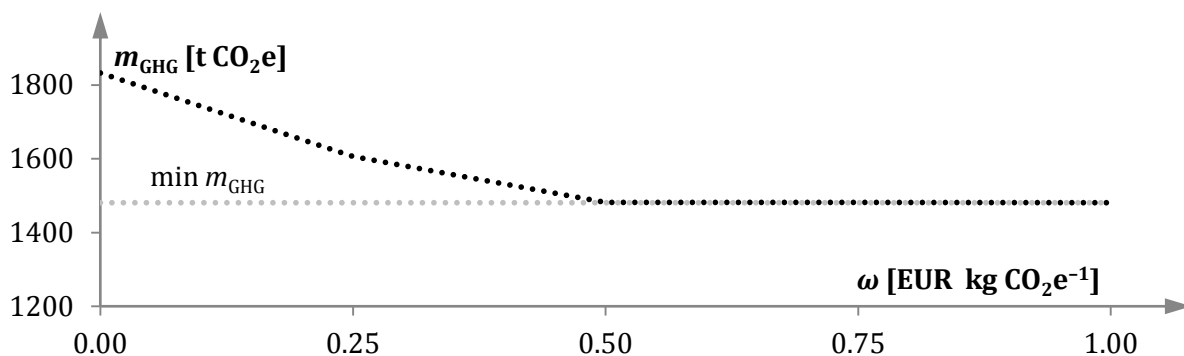
Kada je cilj minimalna potrošnja primarne energije, optimalni režimi rada i izlazni parametri su slični kao u prethodnom slučaju. Postoji određena razlika u rasporedima uključivanja i isključivanja komponenata izazvana pre svega činjenicom da se cena električne energije menja tokom dana, a faktor konverzije  $\varphi_e$  se smatra konstantnim. To takođe uslovljava i nešto veću količinu električne i toplotne energije proizvedene kogeneracijom, uglavnom tokom noći u hladnijem delu godine u odnosu na finansijski optimalni radni režim. Razlika je oko 3–4 %. Na primer, kada je cilj najmanja vrednost  $E_P$ , tokom najhladnijih dana, motor radi bez prestanka, dok u slučaju finansijski optimalnog režima postoji pauza u radu od oko 3 h tokom noći. Razlika u režimima rada uzrokuje razliku u varijabilnim troškovima od oko 3 %, u potrošnji primarne energije oko 1 % i emisiji gasova sa efektom staklene bašte oko 1,3 %.

Režim rada koji se karakteriše minimalnom emisijom gasova sa efektom staklene bašte se dosta razlikuje od prethodna dva, što za posledicu ima i relativno velike razlike vrednosti izlaznih parametara  $Z_V$ ,  $E_P$  i  $m_{\text{GHG}}$ . Motor radi bez prestanka, uglavnom sa maksimalnim

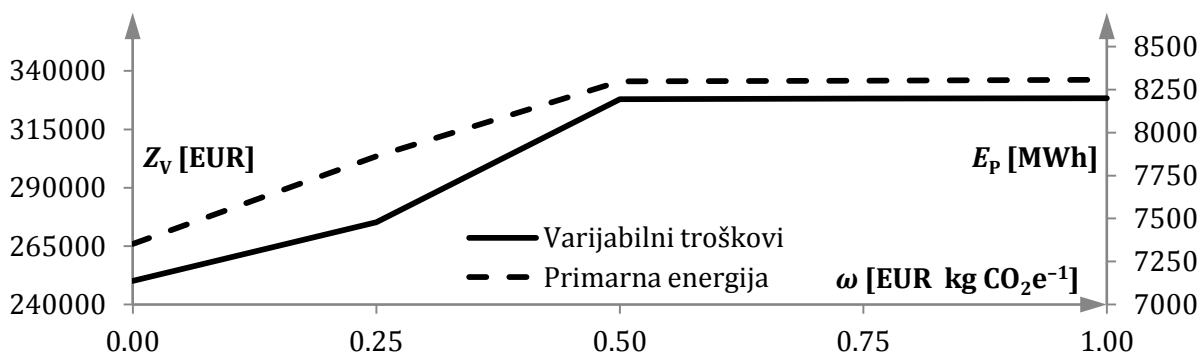
kapacitetom, generišući značajnu količinu električne energije koja se predaje mreži, kao i višak toplotne energije koji se mora izbaciti u okolinu. Ovakav režim je povoljan sa aspekta emisije gasova sa efektom staklene bašte zbog visoke vrednosti faktora konverzije  $\psi_e$  i posledično znatnim pozitivnim efektom isporučene električne energije. Kotlovi rade samo kada motor ne može da pokrije vršno toplotno opterećenje. Veći deo potrebe za hlađenjem se zadovoljava apsorpcionom rashladnom mašinom.

Zavisnost varijabilnih troškova i emisije gasova sa efektom staklene bašte, kao kriterijuma optimizacije ispitivana je uvođenjem nove funkcije cilja — korigovanih varijabilnih troškova u koje ulazi kazneni član koji se odnosi na emisiju:  $Z_V^* = Z_V + \omega m_{\text{GHG}}$ , gde je  $\omega$  cena ili kazneni faktor za emisiju gasova sa efektom staklene bašte, u [EUR/kg CO<sub>2</sub>e]. Ovakva funkcija cilja je definisana jednačinom (3.123), pa se ovaj pristup može smatrati varijantom metode skalarizacije vektora funkcije cilja.

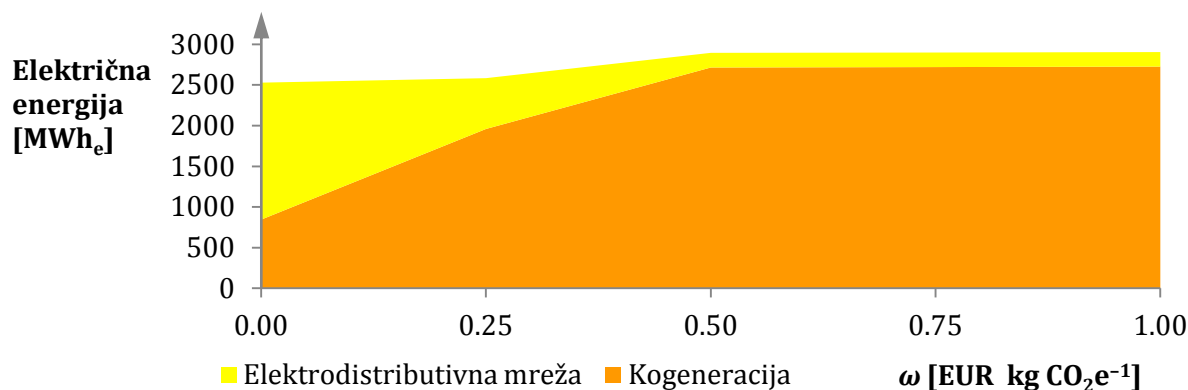
Na slici 5.15 je prikazana zavisnost emisije gasova sa efektom staklene bašte od dodatne cene emisije, a na slici 5.16 promena varijabilnih troškova i potrošnje primarne energije. Za vrednost  $\omega = 0,00$  EUR/kg CO<sub>2</sub>e, funkcija cilja se svodi na  $Z_V$ , dok se već za



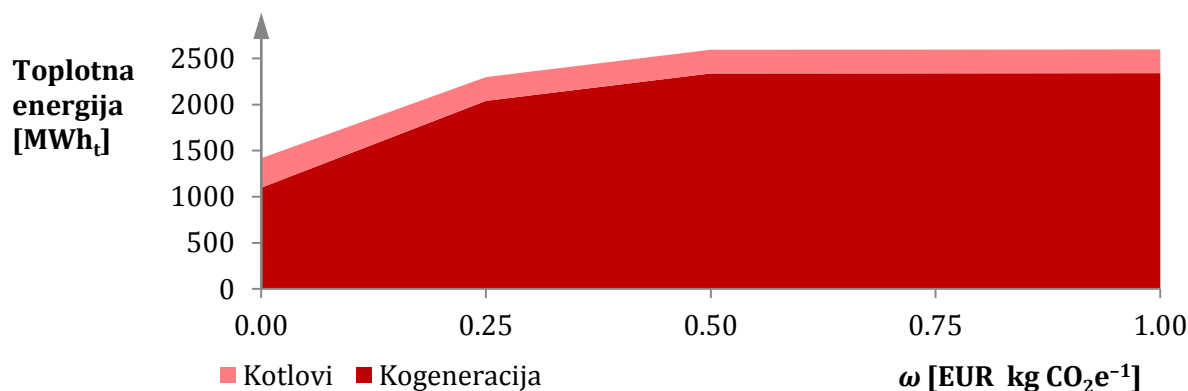
Slika 5.15. Zavisnost emisije gasova sa efektom staklene bašte od dodatne cene emisije



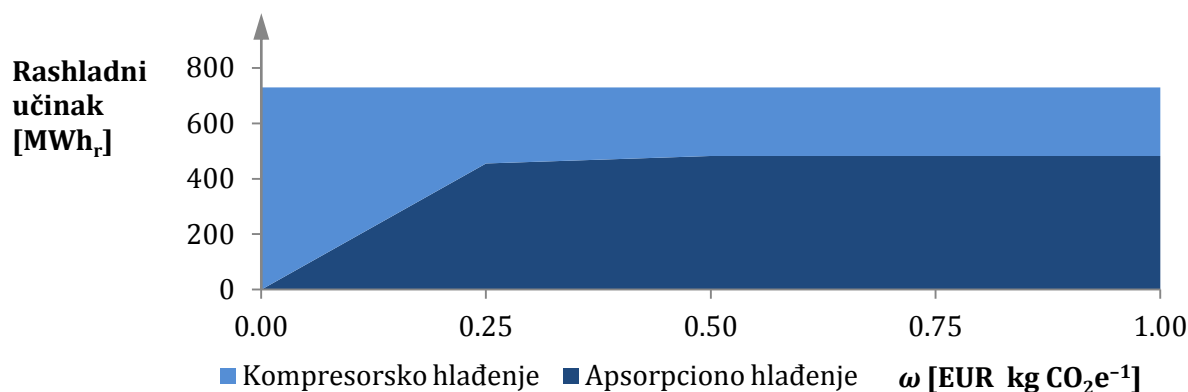
Slika 5.16. Zavisnost varijabilnih troškova i potrošnje primarne energije od dodatne cene emisije



Slika 5.17. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od dodatne cene emisije



Slika 5.18. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od dodatne cene emisije



Slika 5.19. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od dodatne cene emisije

$\omega = 0,50$  EUR/kg CO<sub>2</sub>e dobijaju optimalni radni režimi kao u slučaju minimizacije  $m_{\text{GHG}}$ .

Sa povećanjem vrednosti faktora  $\omega$ , povećava se količina električne i toplotne energije proizvedene kogeneracijom, kao što se vidi sa slika 5.17 i 5.18. Takođe postaje isplativo apsorpciono hlađenje, što je ilustrovano na slici 5.19. Sa slike 5.18 se vidi i da se povećava ukupna proizvedena toplotna energija, što znači da postoji višak koji se odbacuje, kao i da je energija dobijena kotlovima približno konstantna — reč je o vršnom opterećenju koje se ne može pokriti energijom iz motora. U toplotnu energiju iz kogeneracije sa slike 5.18 je uračunata količina predata toploj vodi, uključujući i višak koji se hladnjakom ili rashladnim tornjevima odvede u okolinu, ali ne i višak energije izbačen kroz dimne gasove.

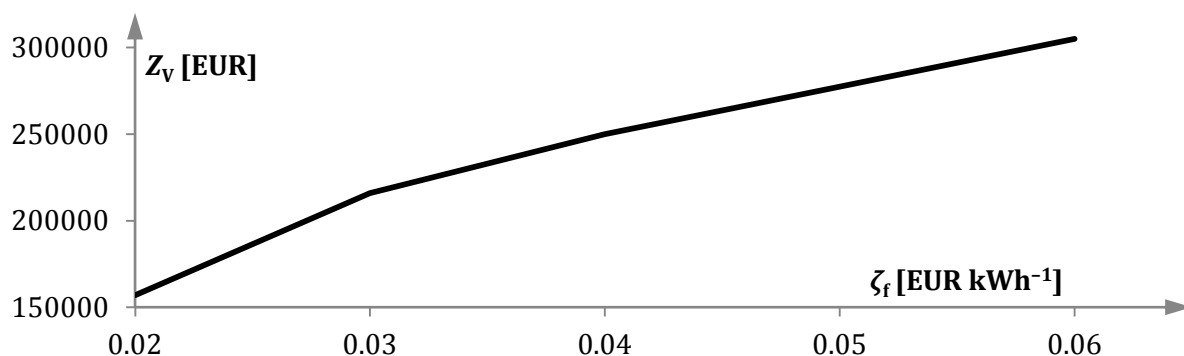
### **5.2.3. Analiza osetljivosti**

U nastavku je prikazana analiza osetljivosti varijabilnih troškova, potrošnje primarne energije, emisije gasova sa efektom staklene bašte i radnih režima na promene cena energenata, faktora konverzije električne energije u primarnu energiju i emisiju gasova sa efektom staklene bašte i potražnje energije, tj. potreba korisnika za grejanjem i hlađenjem. Sve navedene ulazne veličine su sklone promenama i nemoguće je tačno predvideti njihove vrednosti, pa je analiza njihovog uticaja na rezultate značajna. Polazna pretpostavka u većini slučajeva je da energetski sistem radi u finansijski optimalnom režimu.

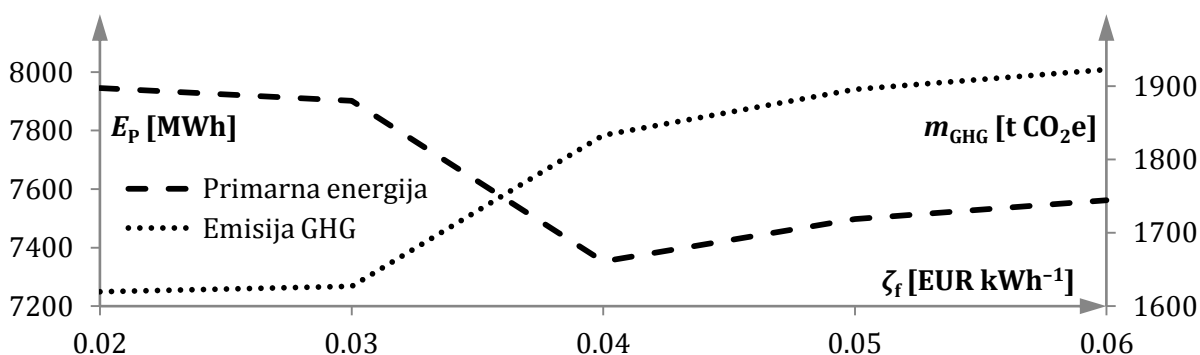
#### *5.2.3.1. Cena goriva*

Sa porastom cene goriva, koja je izražena na osnovu donje toplotne moći, varijabilni troškovi rastu, kao što je prikazano na slici 5.20. Potrošnja primarne energije i emisija gasova sa efektom staklene bašte takođe značajno zavise od cene goriva, tj. promene režima rada postrojenja, kao što je prikazano na slici 5.21. Promena vrednosti emisije gasova sa efektom staklene bašte je takođe monotona — raste sa porastom cene goriva u ispitivanom opsegu, dok potrošnja primarne energije najpre opada, a kasnije blago raste.

Sa niskim cenama prirodnog gasa, do oko 0,03 EUR/kWh, kogenerativne jedinice rade veći deo vremena, najčešće sa punom snagom proizvodeći više toplotne energije nego što je potrebno i odbacujući deo u okolinu. Velika količina električne energije dobijene kogeneracijom se predaje mreži, kao što je prikazano na slici 5.22. To je isplativo zbog relativno niske cene goriva, tj. niskih troškova proizvodnje električne i toplotne energije, u odnosu na cenu po kojoj se prodaje električna energija. Često je količina toplotne energije dobijena kogeneracijom veća nego što se može iskoristiti, pa se kotlovi koriste samo u najhladnijem delu godine, kada nije moguće motorom zadovoljiti potrebu za grejanjem, što se vidi na slici 5.23. Jeftin način dobijanja toplotne energije iz kogeneracije pogoduje



Slika 5.20. Zavisnost varijabilnih troškova od cene goriva

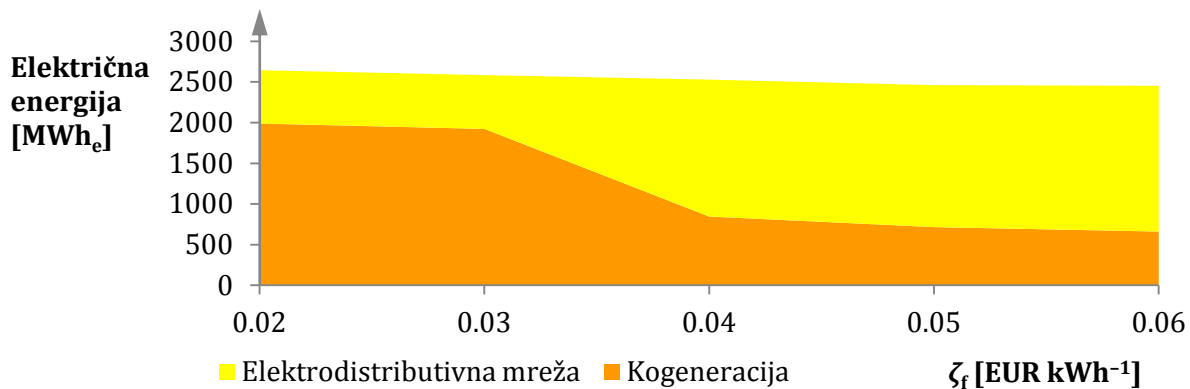


Slika 5.21. Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG) od cene goriva

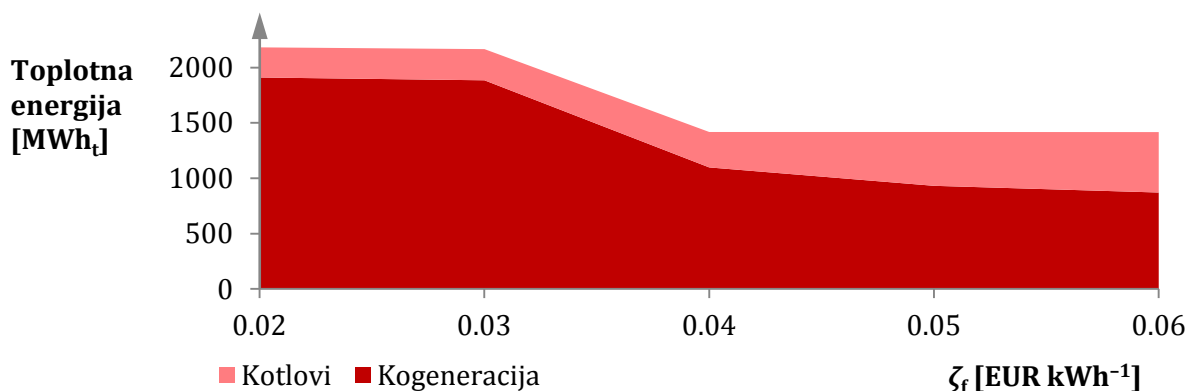
upotrebi apsorpcionih rashladnih mašina, kako je ilustrovano na slici 5.24. Takav režim rada pogodan je sa aspekta emisije gasova sa efektom staklene bašte, ali rezultuje visokom potrošnjom primarne energije.

Sa rastom cene goriva, opada vreme rada i proizvodnja energije kogenerativne jedinice. Posledično raste emisija gasova sa efektom staklene bašte. Kada je cena goriva oko 0,04 EUR/kWh, kako je već razmatrano, proizvodnja toplotne energije iz kogeneracije odgovara potrošnji, tj. nema odbacivanja u okolinu. Kotlovi se i dalje koriste za vršna opterećenja, ali njihova upotreba blago raste. Apsorpciono hlađenje nije isplativo, pa nema ni kogeneracije u letnjem periodu. Ovakav režim je pogodan sa aspekta potrošnje primarne energije koja je tada najmanja.

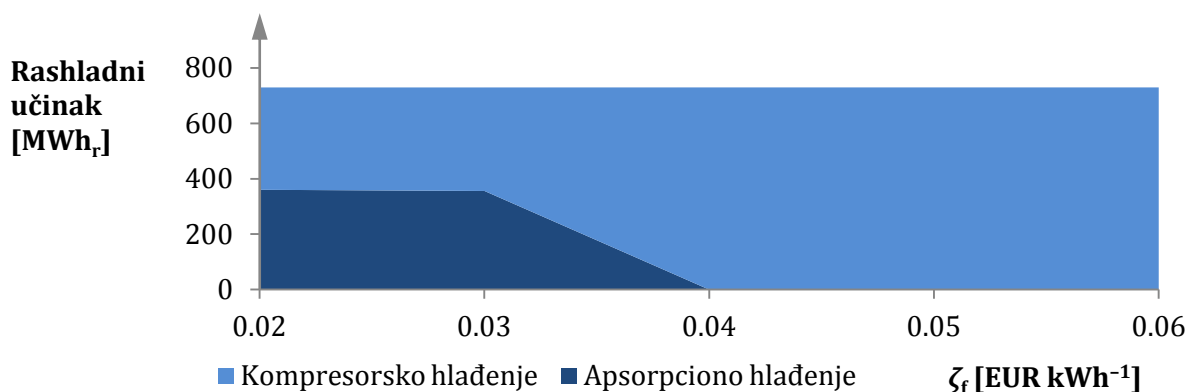
Daljim porastom cene goriva naglo opada proizvodnja kogenerativne jedinice. Ulazi se u režim rada u kome postrojenje proizvodi vrlo malo električne energije za izvoz. Nema odacivanja toplotne energije u okolinu. Motor uglavnom radi onoliko koliko je potrebno da se proizvede dovoljno električne ili toplotne energije za sopstvene potrebe, kao što je rečeno, sa vrlo malo viška električne i bez viška toplotne energije. Manjak električne



Slika 5.22. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od cene goriva



Slika 5.23. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od cene goriva



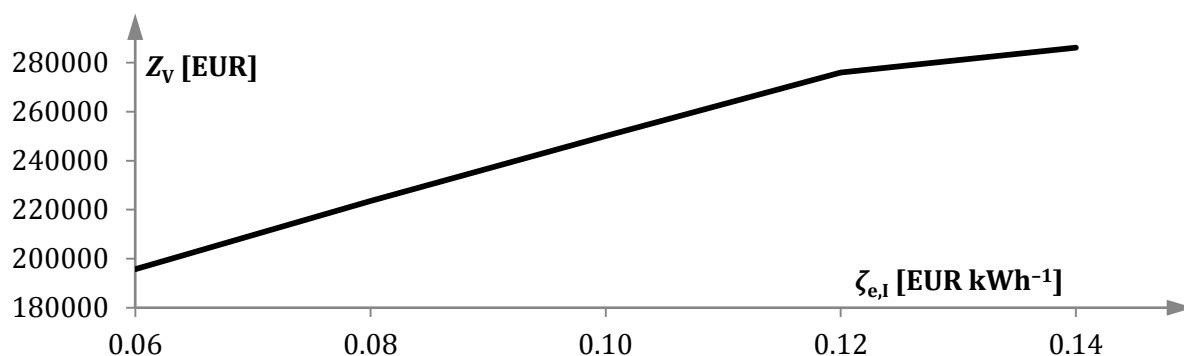
Slika 5.24. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od cene goriva

energije se nadoknađuje iz uvoza, koji raste sa porastom cene goriva, a manjak toplotne iz kotlova, čija proizvodnja takođe raste sa porastom cene goriva. Noću, kada je električna energija iz mreže jeftinija, uglavnom nema kogeneracije, već se ona kupuje.

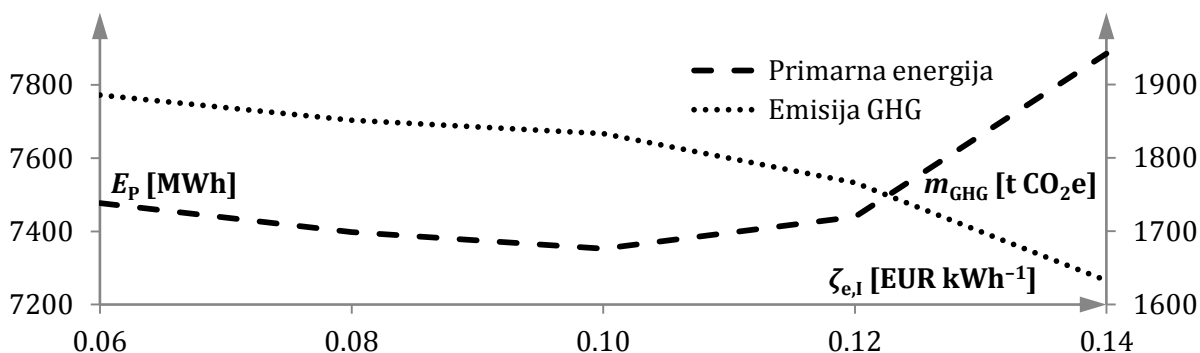
Jasno je da se kontrolom cene goriva za kogeneraciju može uticati na potrošnju primarne energije i emisiju gasova sa efektom staklene bašte, ali je važno primetiti da promena cene može imati suprotne efekte na ova dva parametra, kao što je slučaj u ovom primeru. To je posledica različitih odnosa faktora konverzije  $\varphi$ , odnosno  $\psi$  za električnu energiju i prirodni gas. Više cene prirodnog gasa, uz nepromenjene cene električne energije, svakako ne idu u prilog kogeneraciji i negativno utiču na oba pomenuta parametra.

### 5.2.3.2. Cena preuzete električne energije

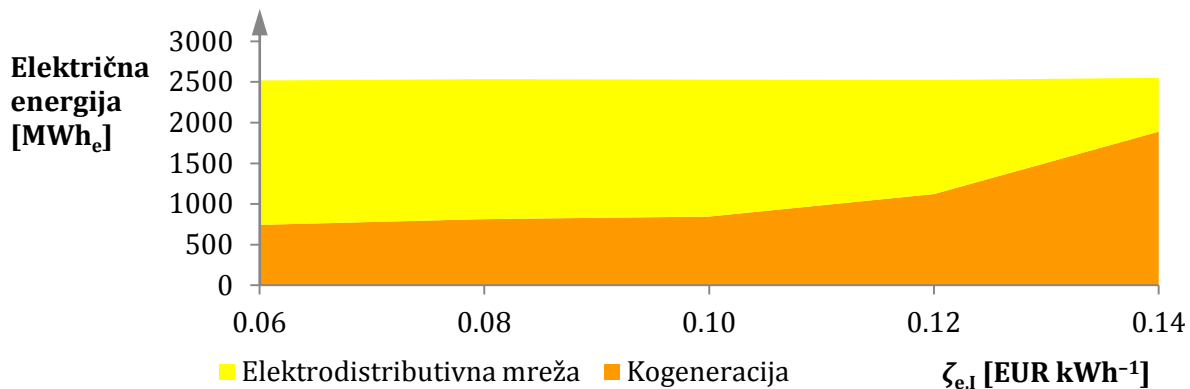
Sa porastom cene električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže rastu varijabilni troškovi, kao što je prikazano na slici 5.25, i opada emisija gasova sa efektom staklene bašte, kao što ilustruje slika 5.26. Promena potrošnje primarne energije



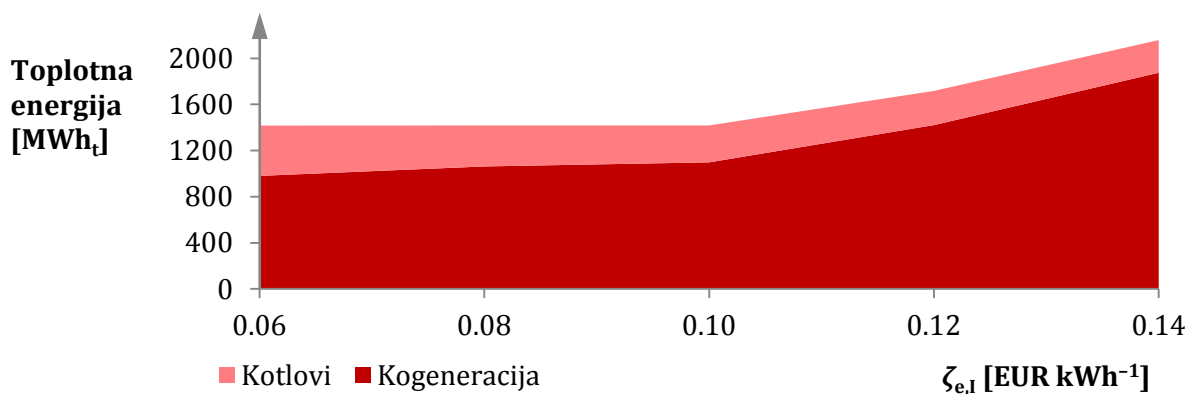
Slika 5.25. Zavisnost varijabilnih troškova od cene preuzete električne energije



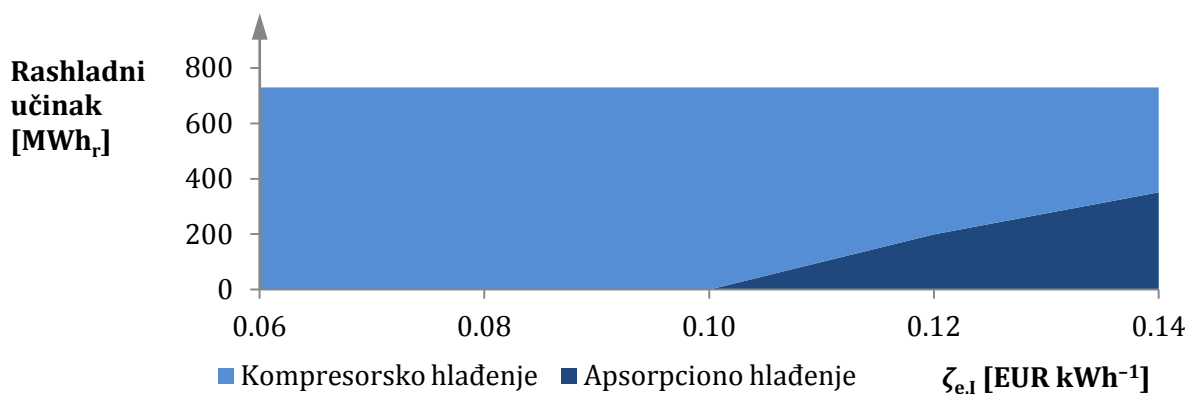
Slika 5.26. Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG) od cene preuzete električne energije



Slika 5.27. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od cene preuzete električne energije



Slika 5.28. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od cene preuzete električne energije



Slika 5.29. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od cene preuzete električne energije

nije monotona funkcija kao ni u prethodnom slučaju. Porast cene preuzete električne energije pozitivno utiče na iskorišćenost kogenerativne jedinice, a za veće vrednosti i na apsorpciono hlađenje. Inače, prikazana cena električne energije na slikama 5.25–5.29 se odnosi na višu, dnevnu tarifu. Cene u nižoj, noćnoj tarifi su četiri puta manje.

Povećanjem cene preuzete električne energije u opsegu viših tarifa do oko 0,10 EUR/kWh, blago raste količina električne i toplotne energije dobijenih kogeneracijom, kao što se vidi sa slika 5.27 i 5.28. Posledično blago opadaju količina električne energije preuzete iz mreže i toplotne energije dobijene u kotlovima. U ovom opsegu, celokupna potreba za hlađenjem se zadovoljava iz kompresorskih rashladnih mašina, što je ilustrovano na slici 5.29, pa potrošnja primarne energije i emisija gasova sa efektom staklene bašte opadaju.

Za cene 0,12 EUR/kWh i više naglo raste proizvodnja električne, a time i toplotne energije kogeneracijom. Višak toplotne energije se odvodi u okolinu, što je izraženije u prelaznim i letnjem periodu. Kotlovi se koriste samo kada se potreba za grejanjem ne može zadovoljiti motorom. Udeo apsorpcionih rashladnih mašina u zadovoljenju potrebe za hlađenjem raste. Ovo je režim rada koji, kao što je već objašnjeno, pogoduje smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte, ali nije poželjan sa aspekta potrošnje primarne energije.

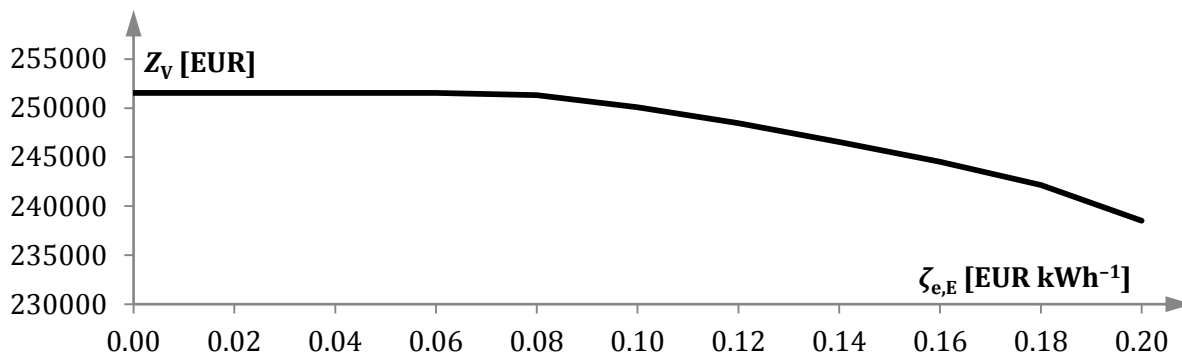
Kao i u slučaju cene goriva, cena preuzete električne energije u određenom opsegu može imati suprotan efekat na potrošnju primarne energije i emisiju gasova sa efektom staklene bašte. U svakom slučaju, viša cena čini preuzmanje energije od distributera nepovoljnijim, odnosno povećava atraktivnost distribuirane proizvodnje kogeneracijom.

### *5.2.3.3. Cena isporučene električne energije*

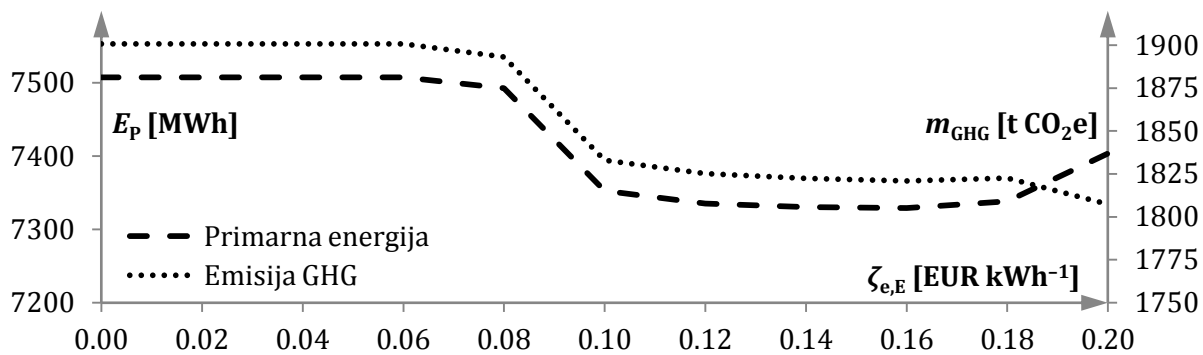
Varijabilni troškovi opadaju sa rastom cene isporučene električne energije, što se vidi na slici 5.30, kao i emisija gasova sa efektom staklene bašte, prema slici 5.31, u posmatranom opsegu cena. Potrošnja primarne energije najpre opada, a zatim raste, što je bio slučaj i sa zavisnošću od ostalih cena energenata.

U opsegu cena isporučene električne energije do 0,06 EUR/kWh nije isplativo proizvoditi električnu energiju za izvoz, pa je količina električne i toplotne energije dobijene u motoru niža, što se vidi sa slika 5.32 i 5.33. Posledica toga je intenzivnija upotreba kotlova za zadovoljenje toplotnog opterećenja.

Sa cenom isporučene električne energije od 0,08 EUR/kWh postoji izvoz električne energije, koji je nešto veći kada je cena 0,10 EUR/kWh. To znači veću upotrebu motora za kogeneraciju i posledično manju upotrebu kotolva za grejanje. Sa ovom cenom počinje nagli pad varijabilnih troškova, potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom



Slika 5.30. Zavisnost varijabilnih troškova od cene isporučene električne energije



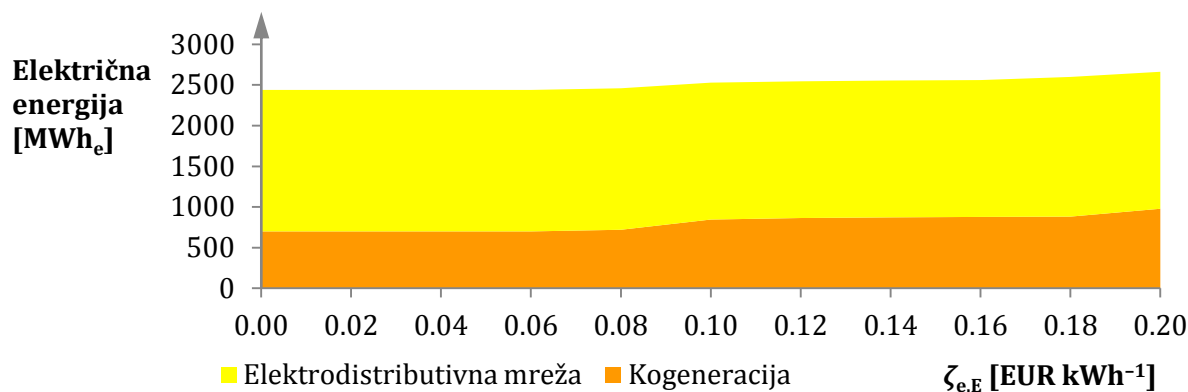
Slika 5.31. Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG) od cene isporučene električne energije

staklene bašte. U opsegu cena 0,10–0,18 EUR/kWh, postrojenje radi bez proizvodnje viška toplotne energije i upotrebe apsorpcionog hlađenja.

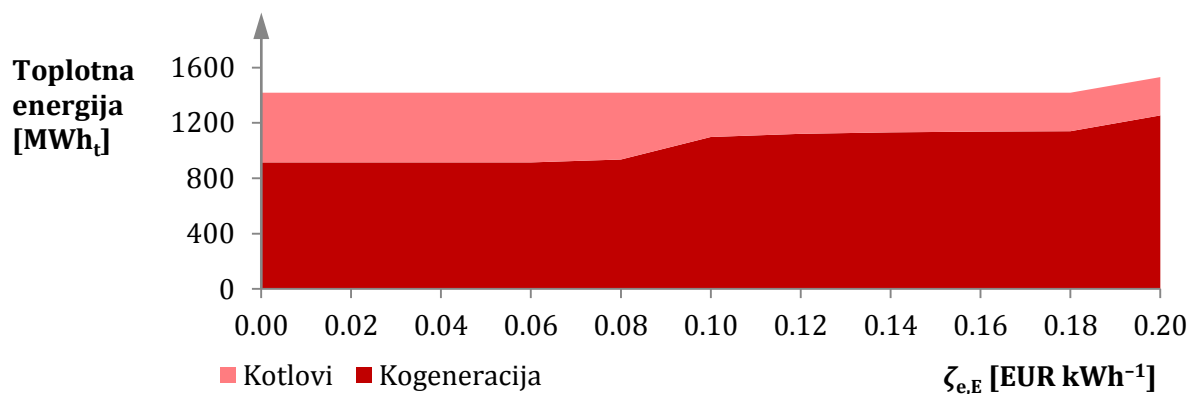
Upotreba apsorpcionih rashladnih mašina i odbacivanje male količine viška toplotne energije u okolinu leti postaje isplativo tek za cene 0,20 EUR/kWh i više, što je ilustrovano na slici 5.34. Posledica toga je dalje smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte i povećanje potrošnje primarne energije.

Na prvi pogled izgleda da ovi rezultati nisu potpuno saglasni sa rezultatima optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara, gde su rad kogenerativnih jedinica sa punim kapacitetom, odbacivanje toplotne energije u okolinu i apsorpciono hlađenje finansijski opravdani već sa cenom od 0,14 EUR/kWh. Ova nesaglasnost je posledica efikasnosti razmatranog motora. Ukoliko se analiza ponovi sa nekim motorom većeg kapaciteta i više efikasnosti, takođe korišćenim u prethodnom primeru, dobijaju se saglasni rezultati, nešto drugačiji od prikazanih na slikama 5.30–5.34.

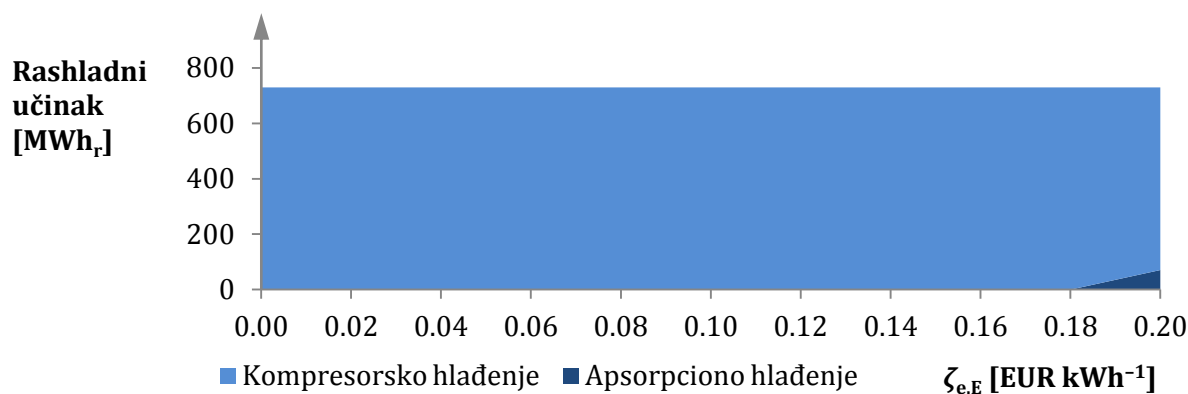
Podsticajne cene električne energije predate distributeru su jedan od najčešćih



Slika 5.32. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od cene isporučene električne energije



Slika 5.33. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od cene isporučene električne energije



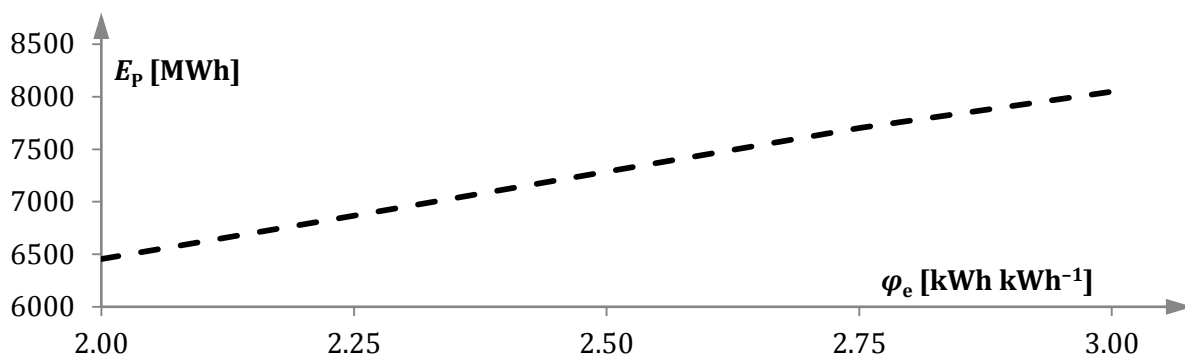
Slika 5.34. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od cene isporučene električne energije

načina promocije visoko efikasne kogeneracije. Njima se značajno utiče na finansijsku prihvatljivost kogeneracije, ali suviše visoke cene mogu negativno uticati na efikasnost, tj. imati za rezultat povećanu potrošnju primarne energije.

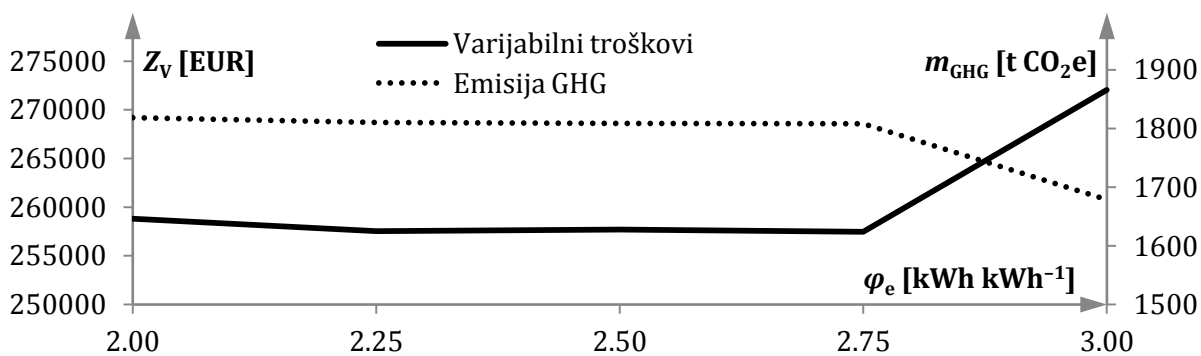
#### 5.2.3.4. Faktori konverzije

Sve razlike između trendova u vezi sa potrošnjom primarne energije i emisijom gasova sa efektom staklene bašte potiču od različitih odnosa faktora konverzije  $\varphi_e/\varphi_f$  i  $\psi_e/\psi_f$ . Kada bi odnosi  $\varphi_e/\varphi_f$  i  $\psi_e/\psi_f$  bili jednaki, funkcije cilja definisane jednačinama (3.116) i (3.117) bile bi ekvivalentne, a optimalni radni režimi identični.

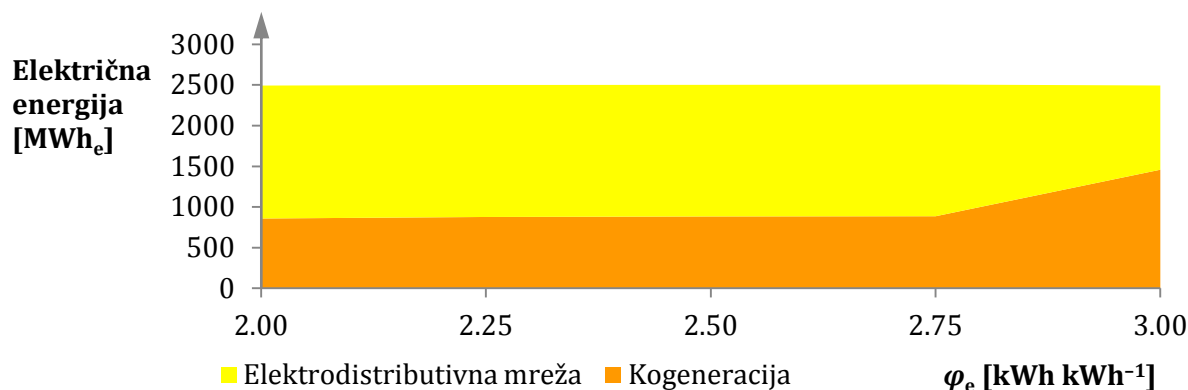
Na slikama 5.35–5.39 prikazane su promene izlaznih veličina u zavisnosti od promene faktora konverzije električne energije u primarnu pri radu sistema za snabdevanje energijom u energetski optimalnom režimu, tj. sa minimalnom potrošnjom primarne energije. Potrošnja primarne energije u posmatranom opsegu raste skoro linearno sa



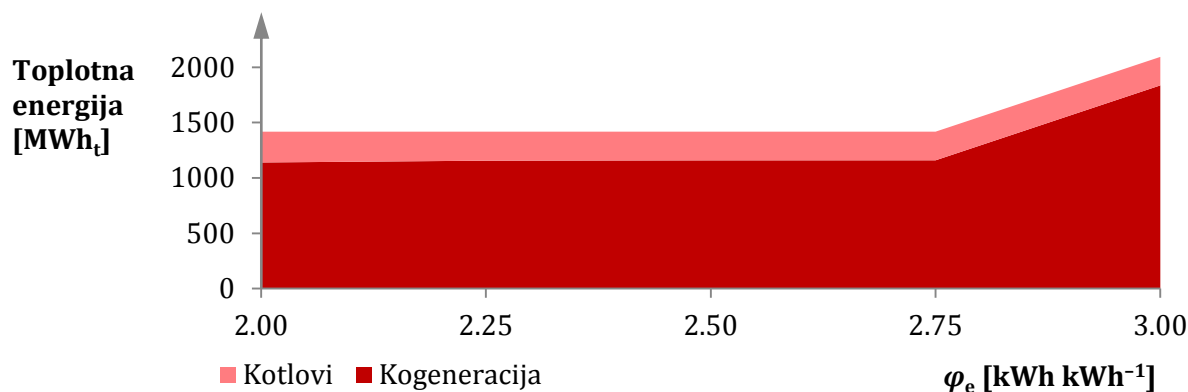
Slika 5.35. Zavisnost potrošnje primarne energije od faktora konverzije električne energije u primarnu



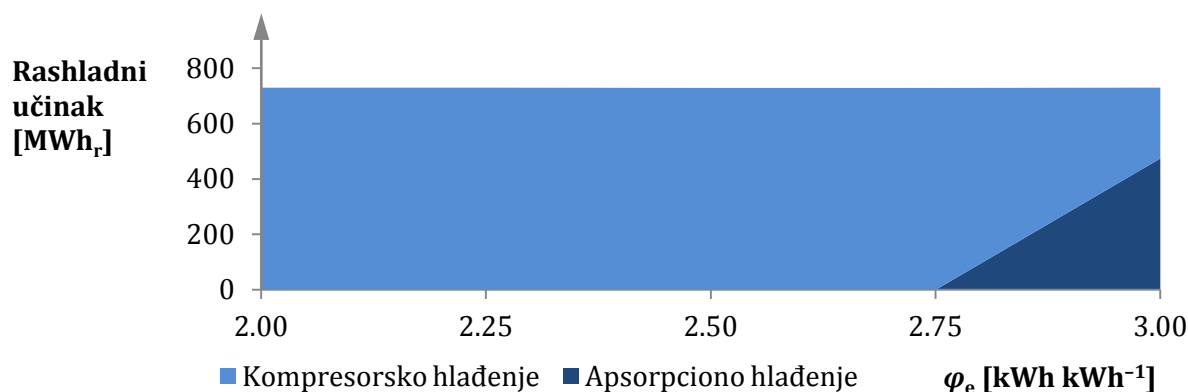
Slika 5.36. Zavisnost varijabilnih troškova i emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG) od faktora konverzije električne energije u primarnu



Slika 5.37. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od faktora konverzije električne energije u primarnu



Slika 5.38. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od faktora konverzije električne energije u primarnu



Slika 5.39. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od faktora konverzije električne energije u primarnu

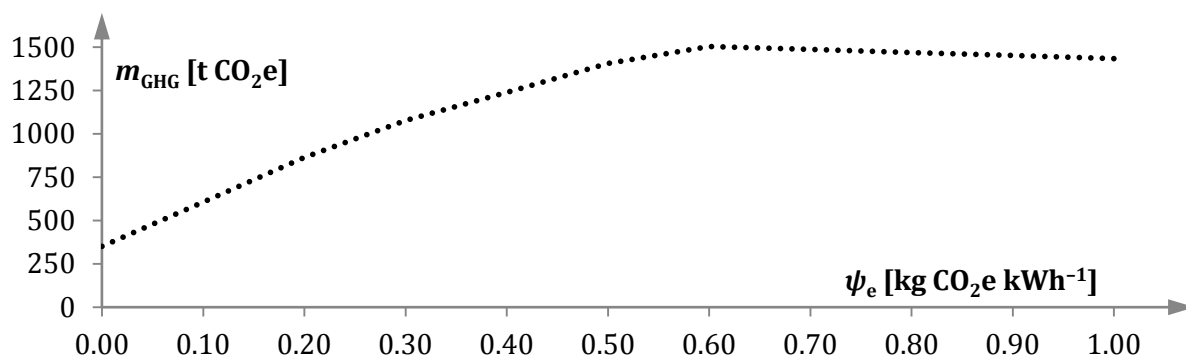
porastom ovog faktora, što se vidi na slici 5.35, dok se sa slike 5.36 može primetiti da emisija gasova sa efektom staklene bašte opada, dok varijabilni troškovi najpre neznatno opadaju, a zatim rastu.

Za vrednosti faktora konverzije električne energije u primarnu u opsegu 2,00–2,75 kWh/kWh postrojenje radi bez viška toplotne energije, kao i upotrebe kogeneracije i apsorpcionog hlađenja leti. Za vrednost 2,00 kWh/kWh, proizvede se nešto manje električne i toplotne energije kogeneracijom nego za veće vrednosti. U opsegu 2,25–2,75 kWh/kWh radni režim je skoro nepromenljiv, kao i varijabilni troškovi i emisija gasova sa efektom staklene bašte.

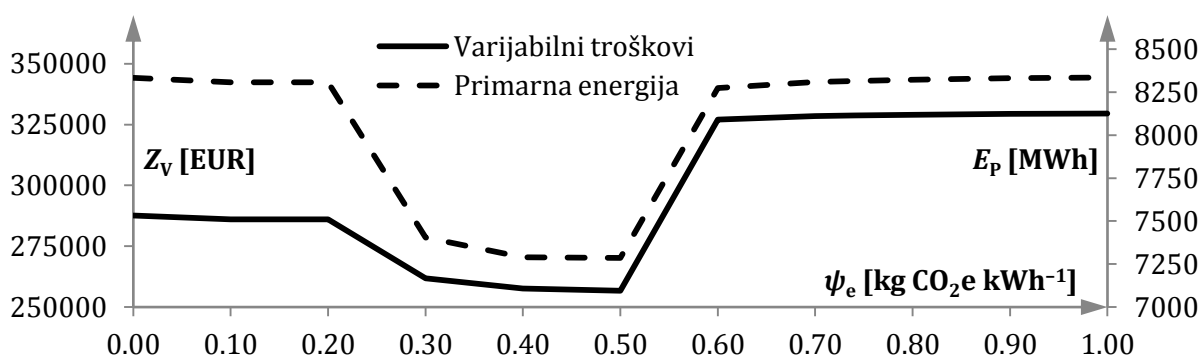
Kada je faktor konverzije električne energije u primarnu jednak 3,00 kWh/kWh, povećava se proizvodnja električne i toplotne energije iz kogeneracije, što ilustruju slike 5.37 i 5.38. Kotlovi se i dalje koriste za vršna opterećenja. Leti se koristi kogeneracija, ali bez proizvodnje i odbacivanja viška toplotne energije, kao i apsorpciona rashladna mašina, što se vidi na slici 5.39.

Na slikama 5.40–5.44 je prikazan uticaj faktora konverzije električne energije razmenjene sa elektrodistributivnom mrežom u emisiju gasova sa efektom staklene bašte. Pretpostavljen je rad sistema za snabdevanje energijom u optimalnom režimu koji odgovara minimalnoj emisiji gasova sa efektom staklene bašte. Ni jedna od zavisnosti na slikama 5.40 i 5.41 nije monotona. Ove promene se razlikuju od onih na slikama 5.35 i 5.36, kao što je rečeno, zbog različitih odnosa konverzionih faktora za gorivo i električnu energiju. Sa slike 5.40 se vidi da emisija gasova sa efektom staklene bašte najpre značajno raste sa porastom odgovarajućeg konverzionog faktora za električnu energiju. Za vrednosti ovog faktora oko 0,6 kg CO<sub>2</sub>e/kWh i veće, dolazi do blagog pada emisije sa daljim porastom  $\psi_e$ . Na slici 5.41 se izdvajaju tri opsega vrednosti faktora  $\psi_e$  sa različitim odgovarajućim vrednostima varijabilnih troškova i potrošnje primarne energije.

Za vrednosti faktora konverzije električne energije u emisiju gasova sa efektom staklene bašte u opsegu 0,00–0,20 kg CO<sub>2</sub>e/kWh kogeneracija nije poželjna jer je negativan uticaj preuzete električne energije iz mreže mali, kao i pozitivan uticaj predate električne energije, dobijene kogeneracijom. Količine električne i toplotne energije proizvedene kogeneracijom su minimalne, kao što se vidi na slikama 5.42 i 5.43. Toplotna energija se dobija iz kotlova, a motor se koristi samo tokom najhladnijih dana kada nije moguće drugačije zadovoljiti potrebe za grejanjem. Hlađenje se obezbeđuje samo kompresorskom rashladnom mašinom, što je prikazano na slici 5.44. U ovom opsegu je emisija gasova sa efektom staklene bašte niska zbog malih vrednosti  $\psi_e$ , a opisanom načinu rada postrojenja odgovaraju visoki varijabilni troškovi i značajna potrošnja primarne energije.



Slika 5.40. Zavisnost emisije gasova sa efektom staklene bašte od faktora konverzije električne energije u emisiju

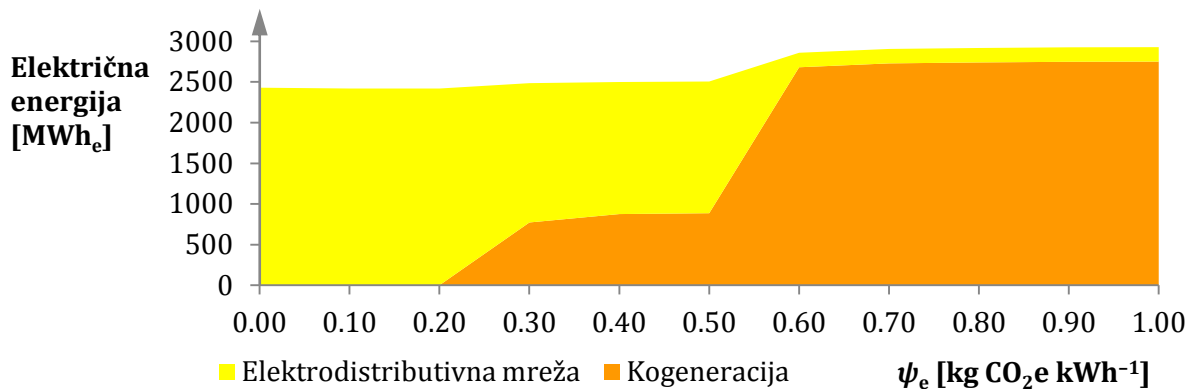


Slika 5.41. Zavisnost varijabilnih troškova i potrošnje primarne energije od faktora konverzije električne energije u emisiju

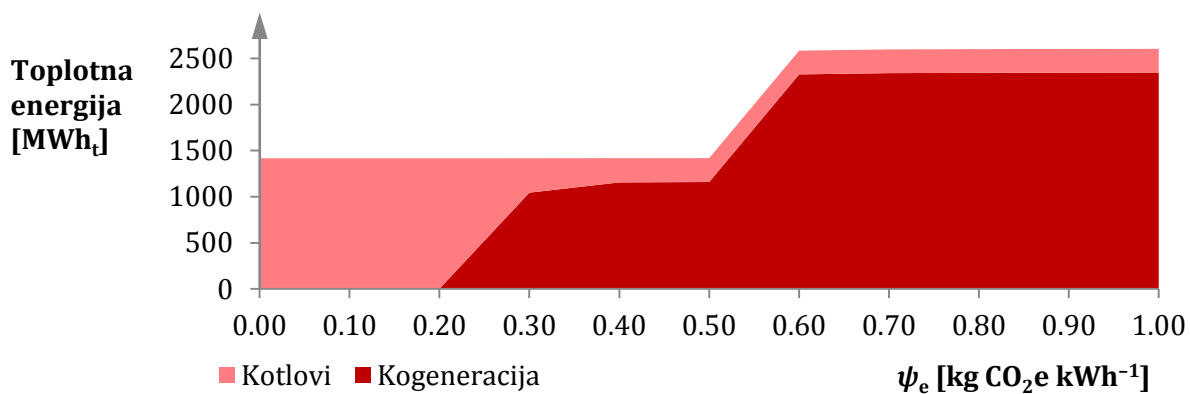
Kada je vrednost faktora  $\psi_e$  u opsegu 0,30–0,50 kg CO<sub>2</sub>e/kWh, koristi se kogeneracija, ali ne i apsorpciono hlađenje. Nema proizvodnje viška toplotne energije i rad odgovara režimu sa niskom potrošnjom primarne energije. Za vrednost  $\psi_e = 0,46$  kg CO<sub>2</sub>e/kWh funkcija cilja definisana jednačinom (3.117) postaje ekvivalentna funkciji cilja iz jednačine (3.116), pa potrošnja primarne energije ima minimum. Varijabilni troškovi su takođe niski.

Za vrednosti  $\psi_e$  od 0,60 kg CO<sub>2</sub>e/kWh naviše, optimalni radni režim se menja. Motor radi tokom cele godine bez prestanka, uglavnom sa maksimalnim opterećenjem zbog značajnog pozitivnog uticaja isporučene električne energije na vrednost funkcije cilja. Proizvodi se i odvodi u okolinu značajna količina toplotne energije, a kotlovi se koriste samo tokom najhladnijih dana za zadovoljenje vršnih opterećenja. Veći deo potrebe za hlađenjem se zadovoljava iz apsorpcionih mašina. Emisija gasova sa efektom staklene bašte blago opada zbog, kako je već rečeno, velikog uticaja isporučene električne energije. Varijabilni troškovi i potrošnja primarne energije prilikom ovakvog rada su visoki.

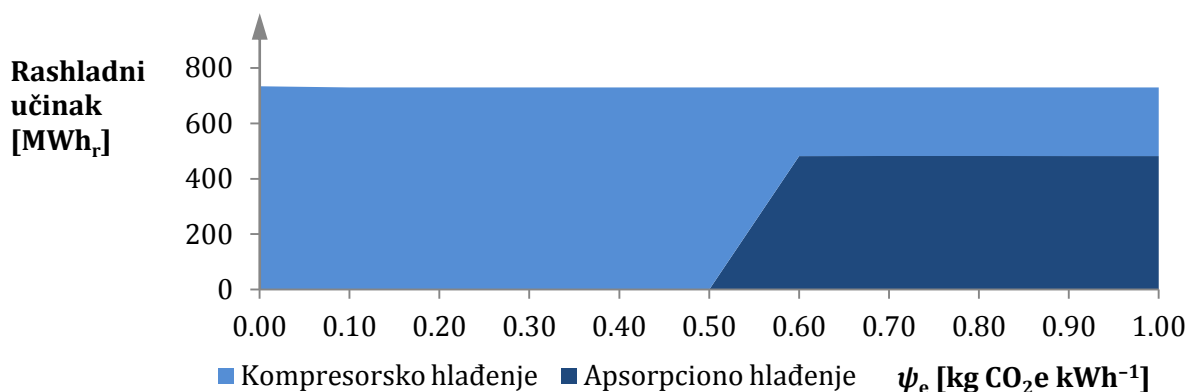
Prethodna analiza je pokazala značajnu zavisnost optimalnih radnih režima razmatranog



Slika 5.42. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od faktora konverzije električne energije u emisiju



Slika 5.43. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od faktora konverzije električne energije u emisiju

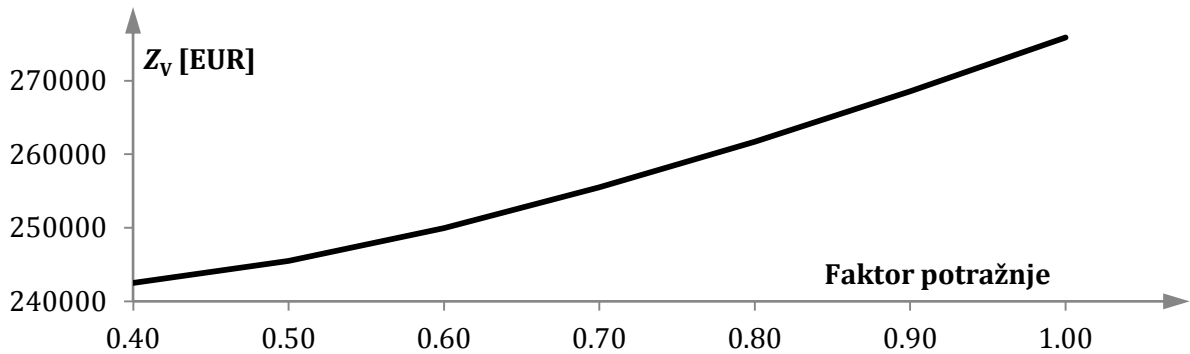


Slika 5.44. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od faktora konverzije električne energije u emisiju

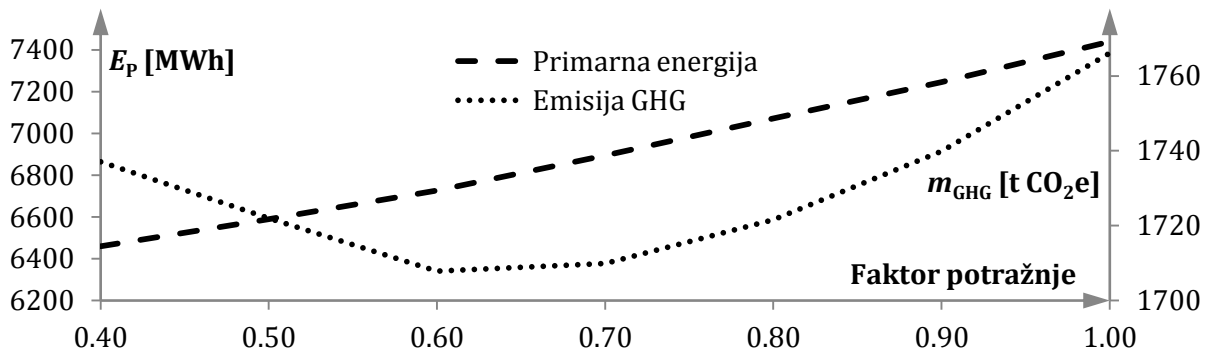
sistema za snabdevanje energijom, troškova, potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte od vrednosti faktora  $\varphi_e$  i  $\psi_e$ . To nameće potrebu za njihovim preciznim određivanjem i uzimanjem u obzir eventualne promenljivosti sa vremenom na dnevnom i godišnjem nivou, kao i u toku životnog veka postrojenja.

### 5.2.3.5. Potražnja energije

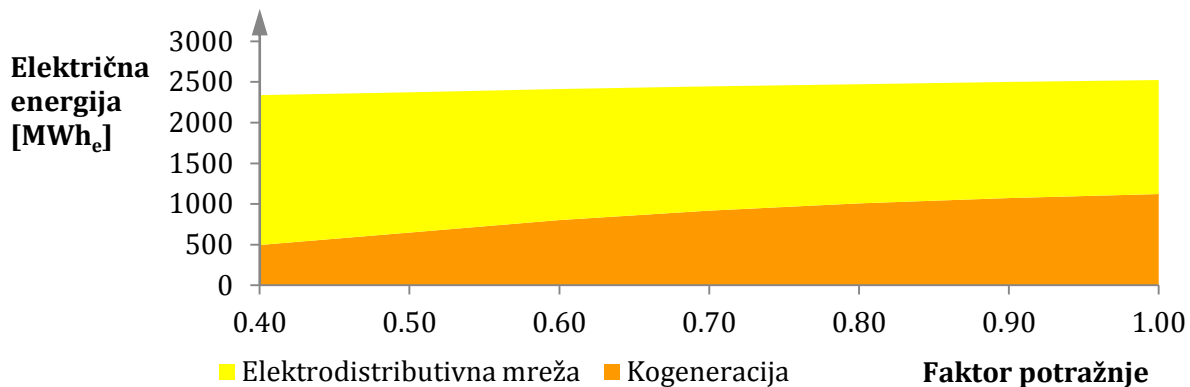
Analiza osetljivosti izlaznih veličina na promenu potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem izvršena je parametričkim variranjem tzv. faktora potražnje i ilustrovana na slikama 5.45–5.49. Zadate potrebe za grejanjem i hlađenjem za svaki vremenski korak se množe odgovarajućom vrednošću faktora potražnje i tako dobijaju nove vrednosti na osnovu kojih se određuju optimalni režimi i odgovarajuće izlazne veličine. Pretpostavljen je rad sistema u finansijski optimalnom režimu, tj. sa minimalnim varijabilnim troškovima. Analiza je izvršena sa vrednošću cene preuzete električne energije 0,12 EUR/kWh tokom dana i 0,03 EUR/kWh tokom noći u cilju prikazivanja uticaja na apsorpciono hlađenje.



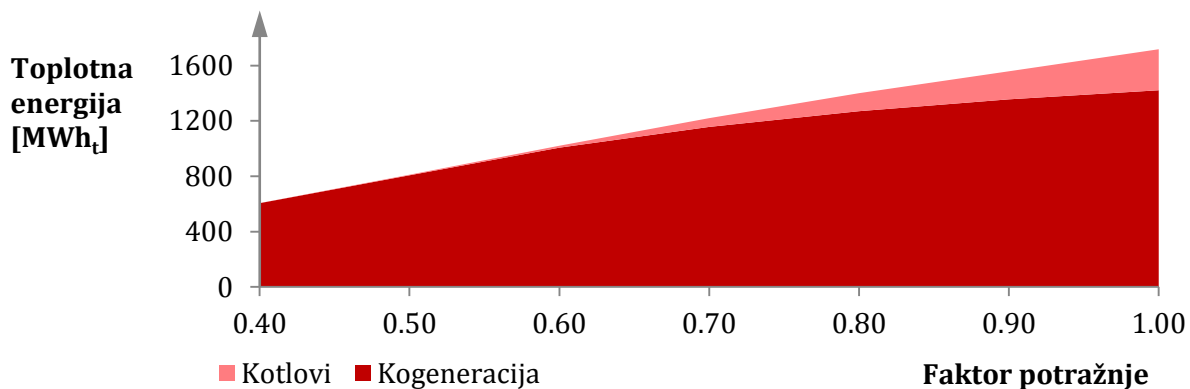
Slika 5.45. Zavisnost varijabilnih troškova od potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem



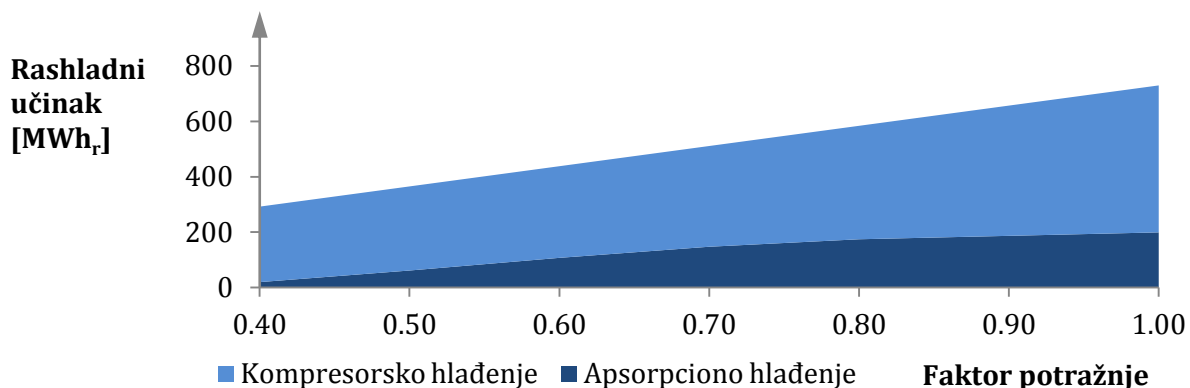
Slika 5.46. Zavisnost potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG) od potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem



Slika 5.47. Zavisnost električne energije preuzete iz elektrodistributivne mreže i dobijene kogeneracijom od potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem



Slika 5.48. Zavisnost toplotne energije dobijene u kotlovima i kogeneracijom od potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem



Slika 5.49. Zavisnost rashladnog učinka kompresorske i apsorpcione mašine od potrebe korisnika za grejanjem i hlađenjem

Sa slike 5.45 se vidi pad varijabilnih troškova sistema za snabdevanje energijom sa padom faktora potražnje, što je i očekivano. Situacija je nešto kompleksnija kada su u pitanju potrošnja primarne energije i emisija gasova sa efektom staklene bašte, kao što je prikazano na slici 5.46. Naime, iz jednačina (3.108) i (3.109) se vidi da smanjenje potrošnje goriva za kogeneraciju i kotlove, kao i preuzete električne energije, npr. iskorišćene za rad komponenata za hlađenje, izaziva pad potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte. Suprotan efekat izaziva promena količine električne energije proizvedene kogeneracijom i isporučene mreži. Na slici 5.46 se vidi da, kada je u pitanju primarna energija, u čitavom razmatranom opsegu faktora potražnje dominira prvi uticaj, pa potrošnja opada. Kod emisije gasova sa efektom staklene bašte, prvi uticaj je dominantan za faktor potražnje iznad, a drugi ispod 0,6.

Na slici 5.47 se može videti da pad potreba za grejanjem i hlađenjem uzrokuje smanjenje količine električne energije proizvedene kogeneracijom, kao i blagi pad ukupne raspoložive količine električne energije. Sa padom potražnje za grejanjem najpre opadaju količine toplotne energije iz motora i kotlova, što se vidi sa slike 5.48. Kada je faktor potražnje jednak oko 0,6, vršna opterećenja su toliko smanjena da je korišćenje kotlova minimalno, pa dalji pad potražnje toplotne energije smanjuje samo proizvodnju kogeneracijom, a posledično i proizvedenu i isporučenu električnu energiju. Smanjenjem potrebe za hlađenjem, prvenstveno se smanjuje rashladni učinak kompresorskih mašina u periodima skuplje električne energije, a zatim učinak apsorpcionih rashladnih mašina. Rashladni učinak apsorpcionih mašina je veoma nizak kada je faktor potražnje oko 0,4, što se vidi na slici 5.49, a skoro celokupna potreba za hlađenjem se zadovoljava kompresorskim mašinama koje rade noću.

Pokazano je da se smanjenjem potražnje energije, što može biti posledica povećanja energetske efikasnosti na strani potrošača, može negativno uticati na emisiju gasova sa efektom staklene bašte. Da li će do toga doći ili ne zavisi od mnogo faktora: postojenja za snabdevanje energijom, potencijala za poboljšanjem na strani potrošača, cena energenata, faktora konverzije itd. Zbog toga je potrebno pažljivo planirati mere energetske efikasnosti na stranama proizvođača i potrošača i posmatrati ih zajedno, kako bi se pravilno procenio njihov ukupni efekat.



## 6. Zaključci

U ovoj doktorskoj disertaciji je prikazana metodologija višekriterijumske optimizacije sistema za snabdevanje energijom pogodna za fleksibilna postrojenja sa kogeneracijom, trigeneracijom i skladištenjem energije. Analizom naučne literature iz ove oblasti, pokazani su značaj i aktuelnost ove teme — optimizacije radnih režima i sveobuhvatne optimizacije strukture postrojenja, projektnih i radnih parametara komponenata. Predloženi pristup optimizaciji je primenjen na primeru izbora postrojenja sa trigeneracijom za energetske snabdevanje stambenog naselja u Nišu. Pretpostavljeno je da postrojenje treba da potpuno zadovolji potrebe potrošača za grejanjem i hlađenjem i delimično za električnom energijom. Energetske potrebe korisnika su procenjene kombinovanjem rezultata merenja potrošnje energije i energetskim simulacijama zgrada.

Prikazani matematički model predstavlja sintezu dosadašnjih znanja uz određena poboljšanja. Model omogućava uzimanje u obzir velikog broja uticajnih parametara i sličan je modelima iz najpoznatijih softvera za energetske simulacije zgrada. Ipak, osmišljen je tako da se — uz adekvatne matematičke transformacije — može koristiti za definisanje problema mešovito celobrojnog linearnog programiranja.

Izbor kriterijuma optimizacije je sličan kao u većini analiziranih radova. Funkcije cilja su: potrošnja primarne energije, emisija gasova sa efektom staklene bašte, ukupni godišnji troškovi i varijabilni troškovi. Predloženi pristup optimizaciji je dovoljno fleksibilan da omogućava uzimanje u obzir i drugih kriterijuma, pa i onih koji se ne mogu prikazati linearnim funkcijama. Za formulaciju problema višekriterijumske optimizacije predložena je metoda  $\varepsilon$ -ograničenja, dok je za kompleksnije slučajeve posebno pogodno fazi programiranja. Pored višekriterijumskih, razmatrani su i problemi optimizacije sa dva nivoa, pri čemu je problem izbora postrojenja višekriterijumski, dok se pretpostavlja da će sistem raditi sa ciljem postizanja najvećeg profita, tj. najmanjih varijabilnih troškova.

Kada se za optimizaciju koristi neka metoda mešovito celobrojnog linearnog programiranja, npr. metoda grananja i ograničavanja ili grananja i sečenja, značajno skraćenje vremena rešavanja problema se može postići prihvatanjem male — unapred zadate — greške, kao i definisanjem dobrih početnih vrednosti celobrojnih nezavisno promenljivih veličina. Pored toga, u ovom slučaju je iskorišćena i specifičnost razmatranog problema optimizacije energetskih sistema, na osnovu koje je definisan redosled izbora celobrojnih nezavisno promenljivih veličina prema kojima se vrši grananje problema, što za posledicu takođe ima skraćenje vremena potrebnog za rešavanje.

Predložena metodologija optimizacije radnih parametara obuhvata dva moguća načina rešavanja problema: (1) kombinovanje metaheurističkih metoda i linearnog programiranja i (2) transformaciju problema i korišćenje mešovitog celobrojnog linearnog programiranja. Za oba načina se koristi pomenuti matematički model. Drugi način je znatno pouzdaniji i omogućava sigurno dobijanje tačnog, tj. optimalnog rešenja. Pored toga, danas je, zahvaljujući napretku računara i adekvatnih softverskih rešenja, drugi način u većini slučajeva značajno efikasniji. Zaključeno je da je pristup kojim se problem optimizacije rešava linearnom transformacijom i korišćenjem mešovitog celobrojnog linearnog programiranja pogodniji od alternativnog pristupa.

Što se tiče razmatranja dužih vremenskih perioda (jedne ili više godina), analizirane su dve mogućnosti za aproksimaciju: (1) aproksimacija posmatranog perioda — tj. vremenski zavisnih ulaznih parametara — tipičnim periodima (npr. danima) i (2) uzimanje u obzir celokupnog perioda i izvođenjem niza procedura kratkoročne optimizacije uz pomeranje perioda optimizacije. Kod obe mogućnosti se koristi isti matematički model, uz različito tretiranje početnih i krajnjih uslova. Dve opcije za aproksimaciju se značajno razlikuju, ali su obe u osnovi zasnovane na kratkoročnoj optimizaciji.

Rezultati pokazuju da se primenom pristupa na bazi pokretnog perioda optimizacije, u konkretnom slučaju, dobijaju veoma bliski rezultati kao i kada se rešava znatno veći, jedinstveni problem za celu godinu. U nekim slučajevima su rezultati i bolji jer je predloženi pristup efikasniji i omogućava brže rešavanje problema uz nižu toleranciju greške. Ovaj pristup je generalno veoma pogodan za duže vremenske periode i fleksibilne sisteme, kao i za simulaciju ponašanja donosioca odluka. Ipak, treba pomenuti da ima i ozbiljnih nedostataka. Pre svega je reč o tretiranju sezonskih akumulatora energije i ograničenja koja se odnose na duže vremenske periode. Kada je neophodno rešiti jedan veliki problem optimizacije radnih parametara za celu godinu, pristup sa pokretnim periodom se može koristiti kao heuristička tehnika za nalaženje dobrih početnih rešenja.

Pored metodologije optimizacije radnih parametara, predložena je i metodologija optimizacije strukture postrojenja i projektnih parametara komponenata, koja takođe podrazumeva optimizaciju režima rada. Veoma važno mesto u predloženoj metodologiji zauzima razmatranje projektnih zahteva koji se, pre svega, odnose na zadovoljenje ekstremnih energetske potreba korisnika. To ovu metodologiju čini alatom primenljivim za projektovanje kompleksnih energetske sistema. Metodologija optimizacije strukture i projektnih parametara podrazumeva strukturnu dekompoziciju problema optimizacije na dva problema: (1) problem višeg nivoa, tj. optimizacije strukture i projektnih parametara i (2) problem nižeg nivoa — optimizacije radnih parametara. Problem višeg nivoa je diskretni, tj. kombinatorički i rešava se metaheurističkim metodama, a u ovom slučaju se koriste: genetski algoritam, kao često korišćena metoda za ovakve probleme; optimizacija

rojevima čestica, koja se uglavnom koristi za kontinualne probleme; simulirano kaljenje i tabu pretraga — metode pogodne za diskretne probleme, ali retko korišćene za optimizaciju energetskeg sistema. Ovaj pristup je veoma pogodan za definisanje i rešavanje problema sa dva nivoa optimizacije, kod koga su funkcije cilja problema višeg i nižeg nivoa suprotstavljene. Korišćenje metaheurističkih metoda, pored toga, omogućava veću fleksibilnost pri definisanju problema — upotrebu nelinearnih funkcija cilja ili funkcija pripadnosti u slučaju fazi programiranja, razmatranje projektnih zahteva i mekih ograničenja itd. Radni režimi se mogu određivati na bilo koji način, uključujući i pristup sa pokretnim periodom optimizacije.

Prikazani matematički model se, uz dodavanje određenih ograničenja, može koristiti i za definisanje i rešavanje integrisanog problema strukture, projektnih i radnih parametara mešovitim celobrojnim linearnim programiranjem pristupom na bazi redukcije nadstrukture sistema. Ovaj pristup garantuje optimalnost dobijenog rešenja i dozvoljava kontrolu greške, ali je za veće probleme manje efikasan nego kada se koriste metaheurističke metode. Pored toga, insistira se na linearnim relacijama, a definisanje i rešavanje problema sa dva nivoa optimizacije je problematično.

Identični rezultati optimizacije strukture postrojenja i projektnih parametara dobijeni su korišćenjem svih navedenih metaheurističkih metoda. Time je pokazana primenljivost svih razmatranih, a posebno ređe korišćenih metoda za optimizaciju energetskeg sistema — simuliranog kaljenja i tabu pretrage. Otvoreno je pitanje upotrebe mnogih sličnih metoda koje ovde nisu korišćene. Kod metaheurističkih metoda, nalaženje optimalnih rešenja nije garantovano, ali dobijanje identičnih rešenja potpuno različitim metodama čini verovatnijom pretpostavku da su pronađena rešenja optimalna ili bliska optimalnim.

U cilju delimične provere tačnosti dobijenih rešenja, identičan problem je definisan i rešen alternativnim pristupom na bazi redukcije nadstrukture. Ovaj pristup je često korišćen u literaturi i garantovano rezultira optimalnim rešenjima. Rešavanje problema je bilo moguće samo u posebnim slučajevima kada problem optimizacije ima jedan nivo. Dobijena su ista rešenja kao i pristupom na bazi strukturne dekompozicije. Time je pokazano da su neka od rešenja dobijenih metaheurističkim metodama potpuno tačna, tj. optimalna. To naravno nije garancija da će se korišćenjem ovih metoda uvek dobiti tačna rešenja, ali predstavlja još jednu od brojnih potvrda njihove primenljivosti i prikladnosti za rešavanje problema optimizacije energetskeg sistema.

Ukoliko se insistira na korišćenju pristupa na bazi redukcije nadstrukture postrojenja, predloženi pristup na bazi strukturne dekompozicije se može koristiti za brzo nalaženje početnog rešenja bliskog optimalnom, kao i za izvođenje zaključaka kojima bi se izvršila polazna redukcija razmatrane nadstrukture i time skratilo vreme rešavanja problema.

Razvoj adekvatnog softvera je jedan od ključnih koraka u implementaciji predloženih metodologija. Implementacija pomenutih fleksibilnih pristupa optimizaciji energetske sistema ne bi bila moguća bez odgovarajućeg softverskog rešenja. Osnovni zadaci softverskog rešenja razvijenog u okviru ovog istraživanja su definisanje i rešavanje problema optimizacije, što može biti zahtevano mnogo puta u toku jedne procedure, kao i izračunavanje vrednosti izlaznih veličina.

Rezultati optimizacije strukture prostrojenja i projektnih parametara komponenata su prikazani kao Pareto skupovi optimalnih rešenja. Pareto skupovi pokazuju međusobni odnos vrednosti različitih funkcija cilja u zavisnosti od njihovog relativnog značaja za donosioca odluka. Pod pretpostavkom rada u finansijski optimalnom režimu, za zadate vrednosti ulaznih parametara, pokazana je finansijska isplativost sistema sa jednom relativno malom kogenerativnom jedinicom i skladištenjem energije, ali bez apsorpcionog hlađenja. Fleksibilnost u radu, kao jedna od prednosti sistema sa dve jedinice, nadoknađuje se upotrebom akumulatora energije. Ovakvo rešenje je takođe bolje od alternative bez kogeneracije i skladištenja energije sa aspekata potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte. Pareto optimalna rešenja sa većim kapacitetima za kogeneraciju, finansijski su nepovoljnija, ali imaju bolje vrednosti potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte.

Minimalna moguća potrošnja primarne energije i emisija gasova sa efektom staklene bašte određene su korišćenjem odgovarajućih funkcija cilja i izostavljanjem pretpostavke o radu u finansijski optimalnom režimu iz problema optimizacije. Pretpostavljeni su režimi rada koji takođe odgovaraju minimalnoj potrošnji primarne energije, odnosno emisiji gasova sa efektom staklene bašte. Kada je reč o emisiji gasova sa efektom staklene bašte, poželjni radni režimi se u velikoj meri razlikuju od finansijski optimalnih, a posledično i vrednosti izlaznih parametara u odnosu na kompromisna rešenja. U slučaju primarne energije, režimi rada su sličniji finansijski optimalnim, pa je i razlika izlaznih parametara manja. U svakom slučaju, Pareto skupovi optimalnih rešenja pokazuju da se vrednosti ukupnih troškova, potrošnje primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte koje se odnose na kompromisna rešenja mogu značajno razlikovati od idealnih.

Analiza osetljivosti pokazuje značajnu zavisnost optimalnih struktura, projektnih i radnih parametara od cena energenata. Posebno je važan zaključak da, kada se pretpostavi rad u finansijski optimalnom režimu, promene potrošnje primarne energije nisu monotone. Naprotiv, sa cenama energenata koje nisu povoljne za kogeneraciju, ona nije dovoljno zastupljena, pa je potrošnja primarne energije veća. To je slučaj i kada su cene energenata suviše povoljne za kogeneraciju, pa optimalni radni režimi podrazumevaju energetski neefikasniji rad kogenerativnih jedinica punim kapacitetom bez prestanka i odbacivanje značajne količine toplotne energije u okolinu.

## Zaključci

Optimizacijom radnih parametara korišćenjem pristupa sa pokretnim periodom dobijeni su rezultati konzistentni sa rešenjima problema optimizacije strukture, projektnih i radnih parametara. Pokazano je i da vrednosti izlaznih parametara i optimalni radni parametri značajno zavise od faktora kojima se kvantifikuje uticaj razmene električne energije sa distributivnom mrežom na potrošnju primarne energije i emisiju gasova sa efektom staklene bašte. Naglašeno je da današnja praksa uglavnom podrazumeva aproksimaciju ovih faktora konstantama, ali da takav pristup može da rezultuje značajnim nepreciznostima. Promena potražnje energije može imati značajan uticaj na potrošnju primarne energije i emisiju gasova sa efektom staklene bašte. Smanjenje potražnje u nekim slučajevima može da izazove povećanje emisije gasova sa efektom staklene bašte jer negativno utiče na izvezenu količinu električne energije dobijene kogeneracijom.

Dobijeni rezultati ilustruju značaj razmatranja i optimizacije radnih režima kompleksnih energetske sistema prilikom izbora strukture i projektnih parametara, kao i pri proceni finansijskih, energetske i ekološke efekata njihove izgradnje.

Rečeno je da rezultati optimizacije sistema za snabdevanje energijom značajno zavise od mnogih ulaznih veličina i početnih pretpostavki: cena energenata, faktora konverzije, energetske potreba korisnika itd. Zato su mogućnosti za generalizaciju zaključaka vezanih za konkretne dobijene vrednosti nezavisno promenljivih veličina i izlaznih indikatora ograničene na slične slučajeve. Sa druge strane, predložene metodologije optimizacije radnih parametara sistema za snabdevanje energijom i optimizacije strukture postrojenja i projektnih parametara komponenata su uopštene, široko primenljive i pogodne za mnoge slučajeve koji ovde nisu razmatrani ili su samo pomenuti.

Pored primene u drugačijim slučajevima, budući rad u ovoj oblasti bi mogao da obuhvati dalja metodološka poboljšanja i omogući razmatranje detalja koji ovde nisu uzeti u obzir.

Osim posmatranih, moguće je u uključiti i dodatne komponente sistema, npr. toplotne pumpe, rashladne mašine hladene vazduhom, druge vrste apsorpcionih rashladnih mašina (dvostepene indirektna ili direktna), termičke, fotonaponske ili hibridne solarne panele itd. Mogu se razmatrati i drugi potrošači: bolnice, hoteli, univerziteti i studentski domovi, neka industrijska postrojenja i dr. Metodologiju je takođe moguće primeniti na sisteme daljinskog grejanja i mikro-mreže. Ukoliko je predviđeno razmatranje većih akumulatora energije, umesto tipičnih dana se mogu koristiti nedelje ili se može produžiti pokretni period za koji se vrši kratkoročna optimizacija.

Prikazani pristup na bazi strukturne dekompozicije pogodan je za rešavanje problema sa dva ili više nivoa optimizacije. To može biti primenljivo prilikom definisanja energetske politike. Na višim nivoima, ciljevi bi se odnosili na prioritete zakonodavca, a nezavisno

promenljive veličine na mere energetske politike (visine podsticajnih tarifa, ograničenja koja se nameću postrojenjima itd). Na nižim nivoima bi se simuliralo ponašanje investitora i vlasnika postrojenja koji za cilj imaju maksimizaciju profita pod nametnutim uslovima, tj. ograničenjima i ulaznim parametrima.

Rečeno je da prikazana metodologija optimizacije strukture i projektnih parametara, kao i matematički model mogu da obuhvate i razmatranja, tj. određivanje optimalnih mera energetske efikasnosti na strani potrošača (npr. poboljšanje omotača zgrada). Ovo važi za oba razmatrana pristupa — strukturnu dekompoziciju i redukciju nadstrukture postrojenja. Mere na stranama snabdevača i potrošača energije se uvek moraju razmatrati zajedno jer se ukupni rezultati često ne mogu odrediti samo posmatranjem pojedinačnih efekata. Takav pristup je primenljiv samo kada su funkcije cilja snabdevača i korisnika saglasne. U suprotnom je potrebno definisati problem optimizacije sa dva (ili više) nivoa.

U slučaju optimizacije strukture i projektnih parametara strukturnom dekompozicijom, radni režimi se mogu odrediti na bilo koji način. To znači da se u tu svrhu može koristiti i pristup sa pokretnim periodom kratkoročne optimizacije i da se može izbeći aproksimacija tipičnim periodima i iskoristiti ostale prednosti ovog pristupa.

Pošto je matematički model koji se koristi za određivanje radnih parametara detaljan, a pristup sa pokretnim periodom kratkoročne optimizacije ne zahteva aproksimaciju ulaznih podataka, pre svega energetske potrebe korisnika, ovaj pristup se može koristiti u sprezi sa energetske simulacijama zgrada za određivanje radnih režima energetske sistema, simulirajući ponašanje donosioca odluka.

Kombinacija mešovitog celobrojnog linearnog programiranja za optimizaciju radnih parametara, metaheurističkih metoda i simulacija zgrada se može upotrebiti da se u probleme optimizacije na sofisticiran način uključe funkcije cilja ili ograničenja u vezi sa termičkim komforom. U tom smislu bi se mogao konstruisati problem koji se rešava nekom metaheurističkom metodom, dok se u okviru evaluacije funkcije cilja odvija simulacija energetske ponašanja zgrada i optimizacija režima rada postrojenja.

Metodologija optimizacije radnih parametara sa pokretnim periodom kratkoročne optimizacije treba da se prilagodi problemima sa ograničenjima koja se odnose na celu godinu, npr. u slučajevima kada postoji sezonski akumulator energije. To bi se moglo postići korišćenjem adekvatnih heurističkih tehnika.

Pokazano je da dobijena optimalna rešenja i vrednosti izlaznih parametara u velikoj meri mogu zavisiti od usvojenih ulaznih vrednosti faktora konverzije električne energije u primarnu energiju i emisiju gasova sa efektom staklene bašte. Ovi faktori su smatrani konstantama usled nemogućnosti kvalitetnije procene, ali matematički model dozvoljava

njihovo definisanje za svaki vremenski korak posebno. Njihova preciznija formulacija — odnosno pažljivije razmatranje efekata interakcije kogenerativnih jedinica i potrošača za sistemom za elektroenergetskim sistemom — bi možda uticala na kvalitet rezultata optimizacije i izvedenih zaključaka.

U naučnim i stručnim razmatranjima se sve češće uzima u obzir potrošnja primarne energije i emisija gasova sa efektom staklene bašte u svim fazama životnog ciklusa postrojenja za snabdevanje energijom ili potrošača, tj. zgrada. Iako se često razmatraju energetske i ekološke efekte samo za fazu rada postrojenja, što je slučaj i u ovoj doktorskoj disertaciji, može se reći da analiza životnog ciklusa postaje standard i verovatno će se u budućnosti na tome sve više insistirati. Predložena metodologija optimizacije strukture i projektnih parametara to omogućava. Potrošnja primarne energije i emisija gasova sa efektom staklene bašte tokom ostalih životnih faza — prikupljanja i obrade materijala, izgradnje postrojenja ili zgrade, rušenja i odlaganja otpada — mogu se uzeti u obzir dodavanjem odgovarajućih vrednosti koje ne zavise od radnih, ali su zavisne od strukturnih i projektnih parametara. Ove vrednosti se mogu dodati u funkcijama cilja i ograničenjima, potpuno identično kao investicija u slučaju finansija.

Osim tokova novca, primarne energije i emisije gasova sa efektom staklene bašte, moguće je razmatrati i druge kriterijume, kao što je pouzdanost rada postrojenja i zadovoljenja potreba korisnika, eksergetska efikasnost, emisija lokalnih zagađivača, termički komfor u zgradama, društveni uticaji izgradnje postrojenja sa kogeneracijom i trigeneracijom, makroekonomski uticaji itd. Prilikom razmatranja većeg broja kriterijuma, veoma je pogodno imati fleksibilan matematički model i metodologiju optimizacije. Pored toga, za formulaciju ovakvih problema optimizacije, fazi programiranja može biti veoma pogodno. Tada funkcija cilja postaje maksimalno moguće zadovoljenje svih kriterijuma, a mogu se uzeti u obzir i meka ograničenja, npr. u vezi sa projektnim zahtevima ili termičkim komforom. Funkcije pripadnosti mogu biti izabrane u skladu sa preferencijama donosioca odluka, a pristup optimizaciji na bazi strukturne dekompozicije i korišćenju metaheurističkih metoda omogućava njihove najrazličitije oblike.

Ova doktorska disertacija i rad [99] pokazuju da se osim često korišćenih metaheurističkih metoda — za diskretne probleme u energetici su to pre svega evolutivni algoritmi, genetski algoritmi i sl, a za kontinualne i optimizacija rojevima čestica — mogu koristiti i druge poznate metode, npr. simulirano kaljenje, tabu pretraga itd. Ovaj zaključak dodatno dobija na značaju ako se ima u vidu da postoji veliki broj metoda ove vrste i njihovih varijanti. Jedan od njihovih najvećih nedostataka je nemogućnost garantovanja tačnosti, tj. optimalnosti dobijenog rešenja, pa korišćenje više različitih metaheurističkih metoda za rešavanje istog problema može povećati sigurnost korisnika u kvalitet rezultata. Pored toga, uvek postoji mogućnost kombinovanja dveju ili više metoda.



# Reference

- [1] Costa A., Keane M.M., Torrens J.I., Corry E., Building operation and energy performance: Monitoring, analysis and optimisation toolkit. *Applied Energy* 2013;101:310–316.
- [2] 2011 ASHRAE Handbook—HVAC Applications. USA: ASHRAE; 2011.
- [3] 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment. USA: ASHRAE; 2012.
- [4] 2013 ASHRAE Handbook—Fundamentals. USA: ASHRAE; 2013.
- [5] 2014 ASHRAE Handbook—Refrigeration. USA: ASHRAE; 2014.
- [6] Morvay Z.K., Gvozdenac D.D., *Applied Industrial Energy and Environmental Management*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd.; 2008.
- [7] Orlando J.A., *Cogeneration design guide*. USA: ASHRAE; 1996.
- [8] EDUCOGEN – The European Educational Tool on Cogeneration. The European Association for the Promotion of Cogeneration; 2001.
- [9] Moran M.J., Shapiro H.N., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd.; 2006.
- [10] Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M., *Thermal Design and Optimization*. New York, USA: John Wiley & Sons Inc.; 1996.
- [11] Oak Ridge National Laboratory, BCHP Screening Tool, Version 2. <<http://eber.ed.ornl.gov/bchpsc/>> (30.08.2015.)
- [12] Kawasaki Heavy Industries Ltd, *Kawasaki Gas Turbine Generator Sets*. Cat. No. KT-77705. JP: 2006.
- [13] American Standard Inc., *Trane Horizon Absorption Series. Single-Stage Hot Water or Steam-Fired Absorption Water Chillers 500-1350 Tons*. US: 2004.
- [14] Ryan W., *Driving Absorption Chillers Using Heat Recovery*. *ASHRAE Journal* 2004;46(9): S30–S36.
- [15] Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC. *Official Journal of the European Union* 2004; 47(L 52):50–60.
- [16] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. *Official Journal of the European Union* 2012;55 (L 315):1–56.

- [17] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union 2010;53(L 153):13–35.
- [18] Zakon o energetici. Beograd, SRB: Službeni glasnik Republike Srbije, br. 57/2011; 2011.
- [19] Uredba o uslovima i postupku sticanja statusa povlašćenog proizvođača električne energije. Beograd, SRB: Službeni glasnik Republike Srbije, br. 8/2013; 2013.
- [20] Uredba o merama podsticaja za povlašćene proizvođače električne energije. Beograd, SRB: Službeni glasnik Republike Srbije, br. 8/2013; 2013.
- [21] Rao S.S., Engineering Optimization: Theory and Practice. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2009.
- [22] Ross T.J., Fuzzy Logic With Engineering Applications. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd.; 2010.
- [23] Eiselt H.A., Sandblom C.-L., Linear Programming and its Applications. DE: Springer; 2007.
- [24] Vanderbei R.J., Linear Programming: Foundations and Extensions (International Series in Operations Research & Management Science). USA: Springer; 2007.
- [25] Dréo J., Pétrowski A., Siarry P., Taillard E., Metaheuristics for Hard Optimization. DE: Springer; 2006.
- [26] Howard B., Saba A., Gerrard M., Modi V., Combined heat and power's potential to meet New York City's sustainability goals. Energy Policy 2014;65:444–454.
- [27] Cardona E., Piacentino A., Cardona F., Matching economical, energetic and environmental benefits: An analysis for hybrid CHCP-heat pump systems. Energy Conversion and Management 2006;47(20):3530–3542.
- [28] Chicco G., Mancarella P., Trigeneration primary energy saving evaluation for energy planning and policy development. Energy Policy 2007;35(12):6132–6144.
- [29] Chicco G., Mancarella P., Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part I: Models and indicators. Energy 2008;33(3):410–417.
- [30] Mancarella P., Chicco G., Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part II: Analysis techniques and application cases. Energy 2008;33(3):418–430.
- [31] Canova A., Chicco G., Genon G., Mancarella P., Emission characterization and evaluation of natural gas-fueled cogeneration microturbines and internal combustion engines. Energy Conversion and Management 2008;49(10):2900–2909.
- [32] Chicco G., Mancarella P., A unified model for energy and environmental performance assessment of natural gas-fueled poly-generation systems. Energy Conversion and Management 2008;49(8):2069–2077.

## Reference

- [33] Rieder A., Christidis A., Tsatsaronis G., Multi criteria dynamic design optimization of a small scale distributed energy system. *Energy* 2014;74:230–239.
- [34] Verda V., Colella F., Primary energy savings through thermal storage in district heating networks. *Energy* 2011;36(7):4278–4286.
- [35] Fazlollahi S., Becker G., Maréchal F., Multi-objectives, multi-period optimization of district energy systems: II—Daily thermal storage. *Computers & Chemical Engineering* 2014;71: 648–662.
- [36] Christidis A., Koch C., Pottel L., Tsatsaronis G., The contribution of heat storage to the profitable operation of combined heat and power plants in liberalized electricity markets. *Energy* 2012;41(1):75–82.
- [37] Raine R.D., Sharifi V.N., Swithenbank J., Optimisation of combined heat and power production for buildings using heat storage. *Energy Conversion and Management* 2014; 87:164–174.
- [38] Smith A.D., Mago P.J., Fumo N., Benefits of thermal energy storage option combined with CHP system for different commercial building types. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 2013;1:3–12.
- [39] Gustavsson L., Joelsson A., Life cycle primary energy analysis of residential buildings. *Energy and Buildings* 2010;42(2):210–220.
- [40] Gustavsson L., Joelsson A., Sathre R., Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building. *Energy and Buildings* 2010;42(2): 230–242.
- [41] TRNSYS, Transient System Simulation Tool. <<http://www.trnsys.com/>> (30.08.2015.)
- [42] EnergyPlus Energy Simulation Software. USA: US Department of Energy. <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>> (30.08.2015.)
- [43] eQUEST, the QUick Energy Simulation Tool. <<http://www.doe2.com/equest/>> (30.08.2015.)
- [44] Pagliarini G., Corradi C., Rainieri S., Hospital CHCP system optimization assisted by TRNSYS building energy simulation tool. *Applied Thermal Engineering* 2012;44:150–158.
- [45] Ascione F., Canelli M., De Masi R.F., Sasso M., Vanoli G.P., Combined cooling, heating and power for small urban districts: An Italian case-study. *Applied Thermal Engineering* 2014;71(2):705–713.
- [46] Chesi A., Ferrara G., Ferrari L., Magnani S., Tarani F., Influence of the heat storage size on the plant performance in a Smart User case study. *Applied Energy* 2013;112:1454–1465.

- [47] Gonçalves P, Gaspar A.R., da Silva M.G., Comparative energy and exergy performance of heating options in buildings under different climatic conditions. *Energy and Buildings* 2013;61:288–297.
- [48] Buonomano A, Calise F, Ferruzzi G, Vanoli L, A novel renewable polygeneration system for hospital buildings: Design, simulation and thermo-economic optimization. *Applied Thermal Engineering* 2014;67(1–2):43–60.
- [49] Mago P.J., Smith A.D., Evaluation of the potential emissions reductions from the use of CHP systems in different commercial buildings. *Building and Environment* 2012;53:74–82.
- [50] Aste N, Adhikari R.S., Manfren M., Cost optimal analysis of heat pump technology adoption in residential reference buildings. *Renewable Energy* 2013;60:615–624.
- [51] Fabrizio E., Feasibility of polygeneration in energy supply systems for health-care facilities under the Italian climate and boundary conditions. *Energy for Sustainable Development* 2011;15(1):92–103.
- [52] Naimaster IV E.J., Sleiti A.K., Potential of SOFC CHP systems for energy-efficient commercial buildings. *Energy and Buildings* 2013;61:153–160.
- [53] Gustavsson L., Dodoo A., Truong N.L., Danielski I., Primary energy implications of end-use energy efficiency measures in district heated buildings. *Energy and Buildings* 2011; 43(1):38–48.
- [54] Le Truong N., Dodoo A., Gustavsson L., Effects of heat and electricity saving measures in district-heated multistory residential buildings. *Applied Energy* 2014;118:57–67.
- [55] Barbieri E.S., Dai Y.J., Morini M., Pinelli M., Spina P.R., Sun P., Wang R.Z., Optimal sizing of a multi-source energy plant for power heat and cooling generation. *Applied Thermal Engineering* 2014;71(2):736–750.
- [56] Asadi E., da Silva M.G., Antunes C.H., Dias L., Glicksman L., Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application. *Energy and Buildings* 2014;81:444–456.
- [57] Taghipour Rezvan A., Shams Gharneh N., Gharehpetian G.B., Robust optimization of distributed generation investment in buildings. *Energy* 2012;48(1):455–463.
- [58] Frangopoulos C.A., von Spakovsky M.R., Sciubba E., Brief Review of Methods for the Design and Synthesis Optimization of Energy Systems. *International Journal of Applied Thermodynamics* 2002;5(4):151–160.
- [59] Piacentino A., Cardona E., EABOT–Energetic analysis as a basis for robust optimization of trigeneration systems by linear programming. *Energy Conversion and Management* 2008;49(11):3006–3016.
- [60] Afram A., Janabi-Sharifi F., Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment* 2014;72:343–355.

## Reference

- [61] Lozano M.A., Serra L.M., Carvalho M., Energy Cost Analysis of Simple Trigeneration Systems Under Variable Operation Conditions In: Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems; 2009 August 31–September 3; Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil. 525–534.
- [62] Lozano M.A., Carvalho M., Serra L.M., Operational strategy and marginal costs in simple trigeneration systems. *Energy* 2009;34(11):2001–2008.
- [63] Cardona E., Sannino P., Piacentino A., Cardona F., Energy saving in airports by trigeneration. Part II: Short and long term planning for the Malpensa 2000 CHCP plant. *Applied Thermal Engineering* 2006;26(14–15):1437–1447.
- [64] Bracco S., Delfino F., Pampararo F., Robba M., Rossi M., A mathematical model for the optimal operation of the University of Genoa Smart Polygeneration Microgrid: Evaluation of technical, economic and environmental performance indicators. *Energy* 2014;64:912–922.
- [65] Sakawa M., Kato K., Ushiro S., Operational planning of district heating and cooling plants through genetic algorithms for mixed 0 – 1 linear programming. *European Journal of Operational Research* 2002;137(3):677–687.
- [66] Kalina J., Skorek J., Cost Effective Operation of Boiler Plant with Embedded Gas Engine Cogeneration Module. In: Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2006 (Editors: Frangopoulos C.A., Rakopoulos C.D., Tsatsaronis G.); 2006 July 12–14; Aghia Pelagia, Crete, Greece: Vol. 1–3, 1201–1209.
- [67] Wakui T., Yokoyama R., Tamura I., Kegasa A., Effect of power interchange operation of multiple household gas engine cogeneration systems on energy-saving. *Energy* 2009;34(12):2092–2100.
- [68] Wakui T., Kinoshita T., Yokoyama R., A mixed-integer linear programming approach for cogeneration-based residential energy supply networks with power and heat interchanges. *Energy* 2014;68(15):29–46.
- [69] Carvalho M., Lozano M.A., Serra L.M., Wohlgemuth V., Modeling simple trigeneration systems for the distribution of environmental loads. *Environmental Modelling & Software* 2012;30:71–80.
- [70] Morini M., Pinelli M., Spina P.R., Venturini M., Optimal allocation of thermal, electric and cooling loads among generation technologies in household applications. *Applied Energy* 2013;112:205–214.
- [71] Lozano M.A., Ramos J.C., Carvalho M., Serra L.M., Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings. *Energy and Buildings* 2009;41(10):1063–1075.
- [72] Lozano M.A., Ramos J.C., Serra L.M., Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints. *Energy* 2010;35(2):794–805.

- [73] Casisi M., Pinamonti P., Reini M., Optimal lay-out and operation of combined heat & power (CHP) distributed generation systems. *Energy* 2009;34(12):2175–2183.
- [74] Oh S.-D., Lee H.-J., Jung J.-Y., Kwak H.-Y., Optimal planning and economic evaluation of cogeneration system. *Energy* 2007;32(5):760–771.
- [75] Seo H., Sung J., Oh S.-D., Oh H.-S., Kwak H.-Y., Economic optimization of a cogeneration system for apartment houses in Korea. *Energy and Buildings* 2008;40(6):961–967.
- [76] Magnani F.S., da Silva P.P., Guerra M.R., Hornsby E.M., Adaptability of optimized cogeneration systems to deal with financial changes occurring after the design period. *Energy and Buildings* 2013;58:183–193.
- [77] Kavvadias K.C., Tosios A.P., Maroulis Z.B., Design of a combined heating, cooling and power system: Sizing, operation strategy selection and parametric analysis. *Energy Conversion and Management* 2010;51(4):833–845.
- [78] Wakui T., Yokoyama R., Optimal sizing of residential SOFC cogeneration system for power interchange operation in housing complex from energy-saving viewpoint. *Energy* 2012; 41(1):65–74.
- [79] Wakui T., Yokoyama R., Optimal structural design of residential cogeneration systems in consideration of their operating restrictions. *Energy* 2014;64:719–733.
- [80] Carvalho M., Serra L.M., Lozano M.A., Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. *Energy* 2011;36(6):3779–3790.
- [81] Cao J., Evaluation of retrofitting gas-fired cooling and heating systems into BCHP using design optimization. *Energy Policy* 2009;37(6):2368–2374.
- [82] Gholamhossein Abdollahi H.S., Application of the multi-objective optimization and risk analysis for the sizing of a residential small-scale CCHP system. *Energy and Buildings* 2013;60:330–344.
- [83] Barbato A., Capone A., Optimization Models and Methods for Demand-Side Management of Residential Users: A Survey. *Energies* 2014;7(9):5787–5824.
- [84] Mavrotas G., Diakoulaki D., Florios K., Georgiou P., A mathematical programming framework for energy planning in services' sector buildings under uncertainty in load demand: The case of a hospital in Athens. *Energy Policy* 2008;36(7):2415–2429.
- [85] Bracco S., Dentici G., Siri S., Economic and environmental optimization model for the design and the operation of a combined heat and power distributed generation system in an urban area. *Energy* 2013;55:1014–1024.
- [86] Mehleri E.D., Sarimveis H., Markatos N.C., Papageorgiou L.G., A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighbourhood level. *Energy* 2012;44(1):96–104.

## Reference

- [87] Mehleri E.D., Sarimveis H., Markatos N.C., Papageorgiou L.G., Optimal design and operation of distributed energy systems: Application to Greek residential sector. *Renewable Energy* 2013;51:331–342.
- [88] Caramia M., Dell'Olmo P., Multi-objective Management in Freight Logistics. Increasing Capacity, Service Level and Safety with Optimization Algorithms. UK: Springer; 2008.
- [89] Aki H., Oyama T., Tsuji K., Analysis of energy service systems in urban areas and their CO<sub>2</sub> mitigations and economic impacts. *Applied Energy* 2006;83(10):1076–1088.
- [90] Piacentino A., Barbaro C., Cardona F., Gallea R., Cardona E., A comprehensive tool for efficient design and operation of polygeneration-based energy  $\mu$ grids serving a cluster of buildings. Part I: Description of the method. *Applied Energy* 2013;111:1204–1221.
- [91] Piacentino A., Barbaro C., A comprehensive tool for efficient design and operation of polygeneration-based energy  $\mu$ grids serving a cluster of buildings. Part II: Analysis of the applicative potential. *Applied Energy* 2013;111:1222–1238.
- [92] Carvalho M., Lozano M.A., Serra L.M., Multicriteria synthesis of trigeneration systems considering economic and environmental aspects. *Applied Energy* 2012;91(1):245–254.
- [93] Sakawa M., Matsui T., Fuzzy multiobjective nonlinear operation planning in district heating and cooling plants. *Fuzzy Sets and Systems* 2013;231(16):58–69.
- [94] Burer M., Tanaka K., Favrat D., Yamada K., Multi-criteria optimization of a district cogeneration plant integrating a solid oxide fuel cell–gas turbine combined cycle, heat pumps and chillers. *Energy* 2003;28(6):497–518.
- [95] Fazlollahi S., Mandel P., Becker G, Maréchal F, Methods for multi-objective investment and operating optimization of complex energy systems. *Energy* 2012;45(1):12–22.
- [96] Lu H., Alanne K., Martinac I., Energy quality management for building clusters and districts (BCDs) through multi-objective optimization. *Energy Conversion and Management* 2014;79:525–533.
- [97] Weber C., Maréchal F, Favrat D., Kraines S., Optimization of an SOFC-based decentralized polygeneration system for providing energy services in an office-building in Tokyo. *Applied Thermal Engineering* 2006;26(13):1409–1419.
- [98] Stojiljković M.M., Stojiljković M.M., Blagojević B.D., Multiobjective Combinatorial Optimization of Trigeneration Plants Based on Metaheuristics. In: *Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems* (Editor: Zevenhoven R.); 2014 June 15–19; Turku, Finland. Åbo Akademi University: 199-1–199-13.
- [99] Stojiljković M.M., Stojiljković M.M., Blagojević B.D., Multiobjective Combinatorial Optimization of Trigeneration Plants Based on Metaheuristics. *Energies* 2014;7(12): 8554–8581.

- [100] Somcharoenwattana W., Menke C., Kamolpus D., Gvozdenac D., Study of operational parameters improvement of natural-gas cogeneration plant in public buildings in Thailand. *Energy and Buildings* 2011;43(4):925–934.
- [101] Polyzakis A.L., Malkogianni A.K., Gomes E.E.B., Zapounidis, K.C., Long-term optimisation case studies for combined heat and power system. *Thermal Science* 2009;13(4):49–60.
- [102] Gvozdenac D.D., Petrović J.R., Gvozdenac-Urošević B.D., Industrial gas turbine operation procedure improvement. *Thermal Science* 2011;15(1):17–28.
- [103] Ahnger A., Iversen B., Frejman M., Smart power generation for a changing world. *Cogeneration and On-site Power Production* 2013;14(5):22–26.
- [104] Chicco G., Mancarella P., Distributed multi-generation: A comprehensive view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13(3):535–551.
- [105] Pruitt K.A., Braun R.J., Newman A.M., Evaluating shortfalls in mixed-integer programming approaches for the optimal design and dispatch of distributed generation systems. *Applied Energy* 2013;102:386–398.
- [106] Ommen T., Markussen W.B., Elmegaard B., Comparison of linear, mixed integer and non-linear programming methods in energy system dispatch modelling. *Energy* 2014;74: 109–118.
- [107] Dvořák M., Havel P., Combined heat and power production planning under liberalized market conditions. *Applied Thermal Engineering* 2012;43:163–173.
- [108] Ferrari-Trecate G., Gallestey E., Letizia P., Spedicato M., Morari M., Antoine M., Modeling and Control of Co-generation Power Plants: A Hybrid System Approach. Zurich, CHE: ETH Zurich, Automatic Control Laboratory; 2002. Technical report AUT02-01.
- [109] Onovwiona H.I., Ugursal V.I., Fung A.S., Modeling of internal combustion engine based cogeneration systems for residential applications. *Applied Thermal Engineering* 2007; 27(5–6):848–861.
- [110] EnergyPlus Engineering Reference. The Reference to EnergyPlus Calculations; 2015. <<http://nrel.github.io/EnergyPlus/>> (30.08.2015.)
- [111] Stojiljković M.M., Ignjatović M.G., Vučković G.D., Greenhouse Gasses Emission Assessment in Residential Sector through Buildings Simulations and Operation Optimization. In: Digital Proceedings of the 1<sup>st</sup> South East European Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (Editors: Ban M., Duić N., Markovska N., Schneider D.R., Guzović Z., Schlör H., Ćosić B., Krajačić G., Perković L., Vujanović M.); 2014 June 29–July 03; Ohrid, FYRO Macedonia: 0134-1–0134-15.
- [112] Stojiljković M.M., Ignjatović M.G., Vučković G.D., Greenhouse gases emission assessment in residential sector through buildings simulations and operation optimization. *Energy*, In Press, Corrected Proof, 2015.

## Reference

- [113] Steen D., Stadler M., Cardoso G., Groissböck M., DeForest N., Marnay C., Modeling of thermal storage systems in MILP distributed energy resource models. *Applied Energy* 2015;137:782–792.
- [114] Buoro D., Casisi M., De Nardi A., Pinamonti P., Reini M., Multicriteria optimization of a distributed energy supply system for an industrial area. *Energy* 2013;58:128–137.
- [115] Ortiga J., Bruno J.C., Coronas A., Selection of typical days for the characterisation of energy demand in cogeneration and trigeneration optimisation models for buildings. *Energy Conversion and Management* 2011;52(4):1934–1942.
- [116] Fazlollahi S., Bungener S.L., Mandel P., Becker G, Maréchal F, Multi-objectives, multi-period optimization of district energy systems: I. Selection of typical operating periods. *Computers and Chemical Engineering* 2014;65:54–66.
- [117] Lahdelma R., Hakonen H., An efficient linear programming algorithm for combined heat and power production. *European Journal of Operational Research* 2003;148(1):141–151.
- [118] Rong A., Hakonen H., Lahdelma R., An efficient linear model and optimisation algorithm for multi-site combined heat and power production. *European Journal of Operational Research* 2006;168(2):612–632.
- [119] Rong A., Lahdelma R., Efficient algorithms for combined heat and power production planning under the deregulated electricity market. *European Journal of Operational Research* 2007;176(2):1219–1245.
- [120] Rong A., Lahdelma R., An efficient linear programming model and optimization algorithm for trigeneration. *Applied Energy* 2005;82(1):40–63.
- [121] Rong A., Lahdelma R., An effective heuristic for combined heat-and-power production planning with power ramp constraints. *Applied Energy* 2007;84(3):307–325.
- [122] Stojiljković M.M., Stojiljković M.M., Blagojević B.D., Primary energy savings potential in optimized small scale cogeneration plants. In: *Proceedings of the International Symposium Power Plants; 2008 October 28–31; Vrnjačka Banja, Serbia.*
- [123] Stojiljković M.M., Stojiljković M.M., Blagojević B.D., Mathematical modeling and optimization of tri-generation systems with reciprocating engines. *Thermal Science* 2010;14(2):541–553.
- [124] Stojiljković M.M., Stojiljković M.M., Blagojević B.D., Vučković G.D., Ignjatović M.G., Effects of implementation of co-generation in the district heating system of the Faculty of Mechanical Engineering in Niš. *Thermal Science* 2010;14(Suppl.):S41–S51.
- [125] Åberg M., Widén J., Henning D., Sensitivity of district heating system operation to heat demand reductions and electricity price variations: A Swedish example. *Energy* 2012;41(1):525–540.

- [126] Åberg M., Henning D., Optimisation of a Swedish district heating system with reduced heat demand due to energy efficiency measures in residential buildings. *Energy Policy* 2011;39(12):7839–7852.
- [127] Chicco G., Mancarella P., Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization. *Energy* 2009;34(3):261–273.
- [128] Stojiljković M.M., Blagojević B.D., Vučković G.D., Ignjatović M.G., Mitrović D.M., Optimization of operation of energy supply systems with co-generation and absorption refrigeration. *Thermal Science* 2012;16(Suppl. 2):409–422.
- [129] González-Monroy L.I., Córdoba A., Optimization of energy supply systems with simulated annealing: continuous and discrete descriptions. *Physica A* 2000;284(1–4):433–447.
- [130] Vasebi A., Fesanghary M., Bathae S.M.T., Combined heat and power economic dispatch by harmony search algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2007;29(10):713–719.
- [131] Khorram E., Jaberipour M., Harmony search algorithm for solving combined heat and power economic dispatch problems. *Energy Conversion and Management* 2011;52(2): 1550–1554.
- [132] Kjeldsen N.H., Chiarandini M., Heuristic solutions to the long-term unit commitment problem with cogeneration plants. *Computers & Operations Research* 2012;39(2):269–282.
- [133] Stojiljković M.M., Vučković G.D., Mitrović D.M., Cogeneration and Heat Storage in Optimized District Heating Plants. Impact on Heat Costs and Primary Energy Consumption In: *Proceedings of the 16<sup>th</sup> Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia*; 2013 October 22–25; Sokobanja, Serbia. University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš: 616–627.
- [134] Wille-Hausmann B., Erge T., Wittwer C., Decentralised optimisation of cogeneration in virtual power plants. *Solar Energy* 2010;84(4):604–611.
- [135] Wolfrum P., Kautz M., Schäfer J., Optimal control of combined heat and power units under varying thermal loads. *Control Engineering Practice* 2014;30:105–111.
- [136] Nabona N., Pagès A., A three-stage short-term electric power planning procedure for a generation company in a liberalized market. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2007;29(5):408–421.
- [137] Petruschke P., Gasparovic G., Voll P., Krajačić G., Duić N., Bardow A., A hybrid approach for the efficient synthesis of renewable energy systems. *Applied Energy* 2014;135:625–633.
- [138] Piacentino A., Cardona E., On thermoeconomics of energy systems at variable load conditions: Integrated optimization of plant design and operation. *Energy Conversion and Management* 2007;48(8):2341–2355.

## Reference

- [139] Arcuri P, Florio G, Fragiaco P, A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex. *Energy* 2007;32(8):1430–1447.
- [140] Safaei A, Freire F, Antunes C.H., A model for optimal energy planning of a commercial building integrating solar and cogeneration systems. *Energy* 2013;61:211–223.
- [141] Li H, Nalim R, Haldi P.-A., Thermal-economic optimization of a distributed multi-generation energy system—A case study of Beijing. *Applied Thermal Engineering* 2006; 26(7):709–719.
- [142] Moradi M.H., Hajinazari M., Jamasb S., Paripour M., An energy management system (EMS) strategy for combined heat and power (CHP) systems based on a hybrid optimization method employing fuzzy programming. *Energy* 2013;49:86–101.
- [143] Liu P, Georgiadis M.C., Pistikopoulos E.N., An energy systems engineering approach for the design and operation of microgrids in residential applications. *Chemical Engineering Research and Design* 2013;91(10):2054–2069.
- [144] Liang H, Zhuang W, Stochastic Modeling and Optimization in a Microgrid: A Survey. *Energies* 2014;7(4):2027–2050.
- [145] Menon R.P., Paolone M., Maréchal F., Study of optimal design of polygeneration systems in optimal control strategies. *Energy* 2013;55:134–141.
- [146] Münster M., Morthorst P.E., Larsen H.V., Bregnbæk L., Werling J., Lindboe H.H., Ravn H., The role of district heating in the future Danish energy system. *Energy* 2012;48(1):47–55.
- [147] Ortiga J, Bruno J.C., Coronas A, Operational optimisation of a complex trigeneration system connected to a district heating and cooling network. *Applied Thermal Engineering* 2013;50(2):1536–1542.
- [148] Buoro D, Pinamonti P, Reini M, Optimization of a Distributed Cogeneration System with solar district heating. *Applied Energy* 2014;124:298–308.
- [149] Molyneaux A, Leyland G, Favrat D, Environomic multi-objective optimisation of a district heating network considering centralized and decentralized heat pumps. *Energy* 2010;35 (2):751–758.
- [150] Hu M, Cho H, A probability constrained multi-objective optimization model for CCHP system operation decision support. *Applied Energy* 2014;116:230–242.
- [151] Taghipour Rezvan A, Shams Gharneh N, Gharehpetian G.B., Optimization of distributed generation capacities in buildings under uncertainty in load demand. *Energy and Buildings* 2013;57:58–64.
- [152] Liu X, Optimization of a combined heat and power system with wind turbines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2012;43(1):1421–1426.

- [153] Azizipanah-Abarghooee R., Niknam T., Bina M.A., Zare M., Coordination of combined heat and power-thermal-wind-photovoltaic units in economic load dispatch using chance-constrained and jointly distributed random variables methods. *Energy* 2015;79:50–67.
- [154] Wu H., Liu X., Ding M., Dynamic economic dispatch of a microgrid: Mathematical models and solution algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2014; 63:336–346.
- [155] Liu M.L., Sahinidis N.V., Process planning in a fuzzy environment. *European Journal of Operational Research* 1997;100(1):142–169.
- [156] Sahinidis N.V., Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities. *Computers and Chemical Engineering* 2004;28(6–7):971–983.
- [157] Bilgen B., Application of fuzzy mathematical programming approach to the production allocation and distribution supply chain network problem. *Expert Systems with Applications* 2010;37(6):4488–4495.
- [158] Sakawa M., Kato K., Nishizaki I., An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective stochastic linear programming problems through an expectation model. *European Journal of Operational Research* 2003;145(3):665–672.
- [159] Katagiri H., Sakawa M., Kato K., Nishizaki I., Interactive multiobjective fuzzy random linear programming: Maximization of possibility and probability. *European Journal of Operational Research* 2008;188(2):530–539.
- [160] Sakawa M., Inuiguchi M., Kato K., Ikeda T., A fuzzy satisficing method for multiobjective linear optimal control problems. *Fuzzy Sets and Systems* 1996;78(2):223–229.
- [161] Wang H.F., Wang M.L., A fuzzy multiobjective linear programming. *Fuzzy Sets and Systems* 1997;86(1):61–72.
- [162] Chen H.K., Chou H.W., Solving multiobjective linear programming problems—a generic approach. *Fuzzy Sets and Systems* 1996;82(1):35–38.
- [163] Mazur V., Fuzzy thermoeconomic optimization of energy-transforming systems. *Applied Energy* 2007;84(7–8):749–762.
- [164] Valero A., Lozano M.A., Serra L., Tsatsaronis G., Pisa J., Frangopoulos C., von Spakovsky M.R., CGAM problem: Definition and conventional solution. *Energy* 1994;19(3):279–286.
- [165] Cziesla F., Tsatsaronis G., Iterative exergetic evaluation and improvement of thermal power plants using fuzzy inference systems. *Energy Conversion and Management* 2002;43(9–12):1537–1548.
- [166] Sayyaadi H., Babaie M., Farmani M.R., Implementing of the multi-objective particle swarm optimizer and fuzzy decision-maker in exergetic, exergetic and environmental optimization of a benchmark cogeneration system. *Energy* 2011;36(8):4777–4789.

## Reference

- [167] Sheen J.N., Fuzzy financial profitability analyses of demand side management alternatives from participant perspective. *Information Sciences* 2005;169(3-4):329-364.
- [168] Martinsen D., Krey V., Compromises in energy policy—Using fuzzy optimization in an energy systems model. *Energy Policy* 2008;36(8):2983-2994.
- [169] Piltan M., Mehmanchi E., Ghaderi S.F., Proposing a decision-making model using analytical hierarchy process and fuzzy expert system for prioritizing industries in installation of combined heat and power systems. *Expert Systems with Applications* 2012;39(1):1124-1133.
- [170] Wei B., Wang S.L., Li L., Fuzzy comprehensive evaluation of district heating systems. *Energy Policy* 2010;38(10):5947-5955.
- [171] Barin A., Canha L.N., Abaide A.R., Magnago K.F., Wottrich B., Multicriteria Analysis of the Operation of Renewable Energy Sources taking as basis the AHP Method and Fuzzy Logic concerning Distributed Generation Systems. *The Online Journal on Electronics and Electrical Engineering* 1(1):52-57.
- [172] Glover F., Improved linear integer programming formulations of nonlinear integer problems. *Management Science* 1975;22(4):455-460.
- [173] DOE-2 Engineers Manual, Version 2.1A. Berkeley, California, USA: University of California, Lawrence Berkeley Laboratory; Los Alamos, New Mexico, USA: Los Alamos National Laboratory; 1982.
- [174] Stojiljković M.M., Stojiljković M.M., Blagojević B.D., Optimization of Trigeneration Systems: A Combinatorial Metaheuristic Approach. In: *Proceedings of the 16<sup>th</sup> Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia*; 2013 October 22-25; Sokobanja, Serbia. University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš: 601-615.
- [175] Hooker J.N., Yan H., Grossmann I.E., Raman R., Logic cuts for processing networks with fixed charges. *Computers & Operations Research* 1994;21(3):265-279.
- [176] Frangopoulos C.A., Dimopoulos G.G., Effect of reliability considerations on the optimal synthesis, design and operation of a cogeneration system. *Energy* 2004;29(3):309-329.
- [177] Guide to cost-benefit analysis of investment projects. Structural Funds, Cohesion Fund and Instrument for Pre-Accession. European Commission, Directorate General Regional Policy; 2008.
- [178] Gümüş Z.H., Floudas C.A., Global optimization of mixed-integer bilevel programming problems. *Computational Management Science* 2005;2:181-212.
- [179] Audet C., Savard G., Zghal W., New Branch-and-Cut Algorithm for Bilevel Linear Programming. *Journal of Optimization Theory and Applications* 2007;134:353-370.
- [180] Pieume C.O., Fotso L.P., Siarry P., Solving bilevel programming problems with multicriteria optimization techniques. *OPSEARCH* 2009;46(2):169-183.

- [181] Jarboui B., Damak N., Siarry P., Rebai A., A combinatorial particle swarm optimization for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems. *Applied Mathematics and Computation* 2008;195(1):299–308.
- [182] Tchomté S.K., Gourgand M., Particle swarm optimization: A study of particle displacement for solving continuous and combinatorial optimization problems. *International Journal of Production Economics* 2009;121(1):57–67.
- [183] Grekas D.N., Frangopoulos C.A., Automatic synthesis of mathematical models using graph theory for optimisation of thermal energy systems. *Energy Conversion and Management* 2007;48(11):2818–2826.
- [184] Gurobi Optimization, Inc., Gurobi Optimizer, Version 6.0. Houston, Texas, USA: Gurobi Optimization; 2015. <<http://www.gurobi.com>> (30.08.2015.)
- [185] Gurobi Optimization, Inc., Gurobi Optimizer Reference Manual. Houston, Texas, USA: Gurobi Optimization; 2015. <<http://www.gurobi.com>> (30.08.2015.)
- [186] Microsoft Solver Foundation, Version 3.1. <<https://msdn.microsoft.com/en-us/devlabs/hh145003>> (30.08.2015.)
- [187] LP Solve, Version 5.5.2.0. <<http://sourceforge.net/projects/lpsolve/>> (30.08.2015.)
- [188] Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada. Beograd, SRB: Službeni glasnik Republike Srbije, br. 61/2011; 2011.
- [189] IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (editors). IGES, JP.
- [190] Nacrt strategije razvoja energetike Republike Srbije za period do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine. Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine Republike Srbije, SRB; 2013.
- [191] Rinne S., Syri S., Heat pumps versus combined heat and power production as CO<sub>2</sub> reduction measures in Finland. *Energy* 2013;57:308–318.

## Biografija autora

Mirko Stojiljković, diplomirani inženjer mašinstva, rođen je 14. decembra 1980. godine u Nišu, gde i sada živi. Oženjen je. Govori engleski i francuski jezik.

Diplomirao je 31.01.2005. godine na Mašinskom fakultetu u Nišu, na smeru Termoenergetika i termotehnika sa prosečnom ocenom 9,86 u toku studija i ocenom 10 na diplomskom radu. Dobitnik je Povelje Univerziteta u Nišu kao najbolji diplomirani student Mašinskog fakulteta u Nišu u školskoj 2004/2005. godini. Tokom osnovnih studija, bio je stipendista Ministarstva prosvete i sporta RS i Republičke fondacije za razvoj naučnog i umetničkog podmlatka. Po diplomiranju je upisao poslediplomske magistarske studije na Mašinskom fakultetu u Nišu, smer Termoenergetika i termotehnika, a zatim prešao na doktorske akademske studije, smer Energetika i procesna tehnika. Nakon diplomiranja, završio je nekoliko usko stručnih kurseva obuke iz oblasti energetske efikasnosti.

Od maja 2005. do oktobra 2008. godine radio je kao istraživač pripravnik na Mašinskom fakultetu u Nišu. Od oktobra 2008. godine radi kao asistent na Mašinskom fakultetu u Nišu za užu naučnu oblast Termotehnika, termoenergetika i procesna tehnika. Angažovan je za izvođenje vežbi iz predmeta: Termodinamika, Tehnika hlađenja, Rashladni uređaji, Tehnički materijali, Energetski menadžment u opštinama i gradovima i dr.

Učesnik je brojnih međunarodnih i nacionalnih, naučnih i stručnih projekata iz oblasti energetske efikasnosti, energetskog menadžmenta, obnovljivih izvora energije, termotehnike i zaštite životne sredine. Bio je član Saveta za energetske efikasnost Grada Niša. Bavi se matematičkim modeliranjem, simulacijama i optimizacijom energetskih sistema. Autor je ili koautor jednog pomoćnog udžbenika, više naučnih i stručnih radova i nekoliko softverskih rešenja. Član je ASHRAE (American Society for Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).





## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

### ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног родитеља  
и име Стојиљковић Младен Мирко

Датум и место рођења 14.12.1980, Ниш

### Основне студије

Универзитет Универзитет у Нишу  
Факултет Машински факултет у Нишу  
Студијски програм Термотехника и термоенергетика  
Звање Дипломирани инжењер машинства, смер Термотехника и термоенергетика  
Година уписа 1999.  
Година завршетка 2005.  
Просечна оцена 9,89 (девет и 89/100)

### Магистарске студије

Универзитет —  
Факултет —  
Студијски програм —  
Звање —  
Година уписа —  
Година завршетка —  
Просечна оцена —  
Научна област —  
Наслов завршног рада —

### Докторске студије

Универзитет Универзитет у Нишу  
Факултет Машински факултет у Нишу  
Студијски програм Енергетика и процесна техника  
Година уписа 2007.  
Остварен број ЕСПБ бодова 300 (основне студије) + 120 (докторске студије) = 420  
Просечна оцена 10,00 (десет)

### НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске дисертације Вишекритеријумска оптимизација система тригенерације енергије  
Име и презиме ментора, звање Др Братислав Благојевић, редовни професор  
Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације Машински факултет у Нишу, Наставно научно веће: 612-329-6/2013, 26.04.2013.  
Универзитет у Нишу, Научно стручно веће: 8/20-01-004/13-028, 14.05.2013.

### ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна 233 (двеста тридесет три)  
Број поглавља 6 (шест)  
Број слика (шема, графикона) 66 (шездесет шест)  
Број табела 9 (девет)  
Број прилога —

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ

Примљено: 16.7.2015.			
Орг.јед.	Број	Прилог	Вредности
	612-465/15		

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

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1	<p><u>Stojiljković M.M.</u>, Ignjatović M.G., Vučković G.D., Greenhouse gases emission assessment in residential sector through buildings simulations and operation optimization, Energy, 2015, Corrected proof, doi: 10.1016/j.energy.2015.05.021</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p><i>Предложен је приступ за одређивање радних параметара флексибилних енергетских система са когенерацијом и мањим акумулаторима топлотне енергије. Приступ се базира на краткорочној оптимизацији, коришћењу мешовитог целобројног линеарног програмирања и померању периода оптимизације. Погодан је за анализе које обухватају периоде од једне или више година, посебно у комбинацији са детаљним енергетским симулацијама зграда. Добијени су реалистични резултати уз значајно скраћење времена решавања проблема у односу на алтернативни приступ. Такође је потврђено да је реч о доброј хеуристичкој техници за добијање прецизних приближних решења проблема оптимизације радних параметара. Наглашен је значај узимања у обзир радних режима приликом процене ефеката мера енергетске ефикасности.</i></p>	M21
2	<p><u>Stojiljković M.M.</u>, Stojiljković M.M., Blagojević B.D., Multi-Objective Combinatorial Optimization of Trigeneration Plants Based on Metaheuristics, Energies, 2014, Vol. 7, No. 12, pp. 8554–8581</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p><i>Претходно дефинисана методологија оптимизације структуре, пројектних и радних параметара енергетских система са тригенерацијом и складиштењем енергије, базирана на структурној декомпозицији проблема, је употпуњена и примењена на проблем вишекритеријумске оптимизације и проблем са два нивоа оптимизације. На нивоу структуре и пројектних параметара, функције циља су укупни годишњи трошкови и потрошња примарне енергије. За решавање овог комбинаторичког проблема је коришћено и упоређивано шест метахеуристичких метода. Парето оптимална решења су добијена методом епсилон-огранчења. На нивоу радних параметара, функција циља су варијабилни трошкови. Овај приступ је поређен са алтернативним — трансформацијом проблема и коришћењем мешовитог целобројног линеарног програмирања. Разматране су могућности комбиновања два приступа.</i></p>	M22
3	<p><u>Stojiljković M.M.</u>, Blagojević B.D., Vučković G.D., Ignjatović M.G., Mitrović D.M., Optimization of operation of energy supply systems with co-generation and absorption refrigeration, Thermal Science, 2012, Vol. 16, Suppl. 2, pp. S409–S422</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p><i>Приказан је приступ оптимизацији режима рада енергетских система са тригенерацијом и складиштењем енергије. Приступ се заснива на комбиновању линеарног програмирања и метахеуристичких метода — генетског алгоритма и симулираног каљења. Метахеуристичке методе се користе за одређивање целобројних независно променљивих величина, док се линеарним програмирањем одређују оптималне вредности континуалних величина. Овај приступ је поређен са алтернативним, заснованим на трансформацији проблема и коришћењу мешовитог целобројног линеарног програмирања. У посматраном случају, функција циља су минимални радни трошкови за период од једне године, који је апроксимиран са четири типична дана. Исти резултати су добијени коришћењем оба приступа, али се време потребно за решавање проблема знатно разликује.</i></p>	M23
4	<p><u>Stojiljković M.M.</u>, <u>Stojiljković M.M.</u>, Blagojević B.D., Vučković G.D., Ignjatović M.G., Effects of implementation of co-generation in the district heating system of the Faculty of Mechanical Engineering in Niš, Thermal Science, 2010, Vol. 14, Suppl., pp. S41–S51</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p><i>Приказана је анализа ефеката имплементације когенеративне јединице, тј. гасног клипног мотора са унутрашњим сагоревањем, у систем даљинског грејања Машинског факултета у Нишу након увођења подстицајних тарифа за производњу електричне енергије когенерацијом или коришћењем обновљивих извора енергије. Претпостављен је рад постројења у финансијски оптималним режимима, који се у разматраном случају, како је закључено, углавном поклапају са праћењем топлотног оптерећења. Разматрани су: финансијски индикатори — нето садашња вредност и интерна стопа</i></p>	M23

	<p>приноса за период од 10 година; енергетски индикатори — ексергетска ефикасност и уштеда примарне енергије; као и смањење емисије гасова са ефектом стаклене баште за период од једне године као еколошки индикатор.</p>	
5	<p><u>Stojiljković M.M., Stojiljković M.M., Blagojević B.D., Mathematical modeling and optimization of tri-generation systems with reciprocating engines, Thermal Science, 2010, Vol. 14, No. 2, pp. 541–553</u></p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>Представљен је приступ оптимизацији радног режима система за снабдевање енергијом са тригенерацијом, као и могућности његове примене у комплекснијим поступцима оптимизације. Наглашен је значај разматрања карактеристика компонената при парцијалним оптерећењима. Разматран је период од једне године који је апроксимиран са три типична дана — по једним за зимски, прелазни и летњи период. Проблем оптимизације је решаван линеарним програмирањем. Функција циља је период повраћаја инвестиције, осим при процени максималног смањења потрошње примарне енергије. Приказана је и дискутована зависност периода повраћаја инвестиције и искоришћења потенцијала за смањење потрошње примарне енергије од цене електричне енергије.</p>	M23
6	<p><u>Stojiljković M.M., Stojiljković M.M., Blagojević B.D., Optimization of Trigenation Systems: A Combinatorial Metaheuristic Approach, Proceedings of the 16<sup>th</sup> Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, pp. 601–615, Sokobanja, Serbia, 22–25 October 2013</u></p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>Дефинисана је методологија оптимизације структуре енергетских система са тригенерацијом и складиштењем топлотне енергије, као и пројектних и радних параметара компонената. Методологија се заснива на структурној декомпозицији проблема на: (1) спољашњи дискретни комбинаторички проблем оптимизације структуре и пројектних параметара и (2) унутрашњи проблем оптимизације радних параметара, формулисан као проблем мешовитог целобројног линеарног програмирања. За решавање спољашњег проблема предложене су метахеуристичке методе — генетски алгоритам или оптимизација ројевима честица, док је унутрашњи решаван методом гранања и сечења. Функција циља су укупни годишњи трошкови. Временски период је апроксимиран са четири типична дана. Приказана је анализа осетљивости оптималне структуре и пројектних параметара од улазних величина.</p>	M33
7	<p><u>Stojiljković M.M., Vučković G.D., Mitrović D.M., Cogeneration and Heat Storage in Optimized District Heating Plants. Impact on Heat Costs and Primary Energy Consumption, Proceedings of the 16<sup>th</sup> Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, pp. 616–627, Sokobanja, Serbia, 22–25 October 2013</u></p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>Испитивани су ефекти уградње когенеративних јединица — гасних мотора или гасних турбина — и акумулатора топлотне енергије у систем даљинског грејања мањег капацитета. Анализа је базирана на 21 типичном дану и претпоставци рада постројења у финансијски оптималном режиму, у условима постојања финансисјких подстицаја за производњу електричне енергије когенерацијом. За оптимизацију режима рада је коришћено мешовито целобројно линеарно програмирање. Разматрани су трошкови производње топлотне енергије и потрошња примарне енергије. Закључено је да су гасни мотори боље решење у конкретном случају, пре свега због веће ефикасности. Показано је да сувише високе подстицајне цене електричне енергије могу имати негативан утицај на потрошњу примарне енергије.</p>	M33
8	<p><u>Stojiljković M.M., Stojiljković M.M., Blagojević B.D., Primary energy savings potential in optimized small scale cogeneration plants, Proceedings of the International Symposium Power Plants 2008, Vrnjačka Banja, Serbia, 28–31 October 2008</u></p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>Разматран је потенцијал смањења потрошње примарне енергије имплементацијом енергетских система са тригенерацијом за различите вредности енергетских потреба корисника. Максимално смањење потрошње примарне енергије је одређивано помоћу оптимизације радних режима за задате пројектне параметре постројења.</p>	M33

## ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

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

ДА  НЕ

*Образложење*

Кандидат је положио све испите предвиђене наставним планом и програмом, објавио довољан број научних радова и поднео радну верзију докторске дисертације одговарајуће садржине, обима и квалитета, у складу са одобреном темом докторске дисертације.

## ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

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

Разматрани рукопис се састоји из шест поглавља: увод, стање проблема, приступ проблему, примена предложене методологије, анализа резултата и закључци. Претходе им: резиме на српском и енглеском језику, садржај, спискови табела и слика и листа ознака. На крају се налази списак 190 референци и биографија аутора.

У уводу је наглашен значај имплементације и оптимизације система са когенерацијом и тригенерацијом — главни мотив бављења овом темом. Сагледани су место оптимизације енергетских система у научним истраживањима и могућности за остварење научног напретка у овој области. Истакнути су најзначајнији сегменти дисертације и дат је преглед садржине осталих поглавља.

У другом поглављу су разматрани аспекти система когенерације и тригенерације од значаја за тему дисертације, пре свега радне карактеристике, могућности примене и индикатори за евалуацију. Дат је квалитетан, детаљан, опширан и свеобухватан преглед научне литературе, укључујући најновија истраживања. Посебан акценат је стављен на: избор критеријума оптимизације, методолошке приступе оптимизацији радних режима, односно структуре и пројектних параметара енергетских постројења, детаље математичких модела, ефекте имплементације компонената и система од интереса и коришћење фази програмирања. Приказана је интересантна анализа трендова и могућих побољшања у овој области, као што је дефинисање проблема оптимизације са два нивоа, софистицираније разматрање пројектних захтева итд.

У трећем поглављу је дат детаљан и свеобухватан математички модел посматраних енергетских система и најзначајнијих компонената уз предложене технике линеаризације проблема. Дефинисан је проблем вишекритеријумске оптимизације. Посебна пажња је посвећена задовољењу пројектних захтева. Предложена је методологија оптимизације режима рада постројења која се може базирати на апроксимацији разматраног периода или краткорочној оптимизацији са покретним периодом. Предложена је и методологија оптимизације структуре и пројектних параметара постројења која може обухватити оптимизацију режима рада. Методологија се заснива на структурној декомпозицији проблема и коришћењу метахеуристичких метода за решавање комбинаторичког проблема оптимизације структуре и пројектних параметара и мешовитог целобројног линеарног програмирања за решавање проблема оптимизације режима рада. Коришћене метахеуристичке методе су: генетски алгоритам, оптимизација ројевима честица, симулирано каљење и табу претрага. Наглашена је погодност оваквог приступа за формулацију и решавање проблема оптимизације са два нивоа.

Четврто поглавље садржи формулације два конкретна проблема: (1) проблема оптимизације структуре, пројектних и радних параметара и (2) проблема оптимизације радних параметара постројења. Дат је и приказ улазних параметара. Проблеми се односе на снабдевање енергијом изабраног стамбеног насеља. Први проблем има два нивоа и решава се структурном декомпозицијом. Код другог се користи оптимизација радних параметара на бази покретног периода.

У петом поглављу су приказани резултати примене предложених методологија на оба разматрана проблема. У првом случају, за решавање проблема вишекритеријумске оптимизације је коришћена метода епсилон ограничења, а приказана је и употреба фази формулације проблема. Иста Парето оптимална решења су добијена коришћењем све четири метахеуристичке методе. Код проблема са једним нивоом оптимизације, исто решење је добијено редукијом надструктуре постројења и коришћењем мешовитог целобројног линеарног програмирања. У другом случају је показано да приступ

оптимизације режима рада на бази покретног периода даје веома прецизне резултате уз високу ефикасност. У оба случаја су анализирани режими рада и осетљивост резултата на улазне параметре. Показана је значајна могућност смањења потрошње примарне енергије и емисије гасова са ефектом стаклене баште, али и њихова зависност од вредности улазних параметара и избора функције циља. У том контексту је дат осврт на примену оптимизације енергетских система при дефинисању енергетске политике.

Закључци се односе на: применљивост предложених приступа оптимизацији, њихово поређење са алтернативама које су чешће коришћене у литератури, могућности комбиновања различитих приступа, као и на резултате њихове примене у конкретним случајевима. Посебно је важан закључак да су предложене методологије оптимизације уопштене и широко применљиве, док резултати добијени њиховом применом на конкретним примерима имају потенцијал генерализације ограничен на сличне случајеве. Детаљно су дискутоване могућности за даљи рад у овој области са методолошког и апликативног аспекта. Методолошки, могуће је даље побољшавати математички модел, испитати применљивост других метахеуристичких метода, боље прилагодити приступ базиран на покретном периоду оптимизације проблемима у којима се јавља сезонско складиштење енергије, комбиновати различите приступе у циљу побољшања тачности или ефикасности решавања проблема итд. Предложене методологије је могуће применити и на другачија постројења, оптимизацију мера енергетске ефикасности на страни потрошача, анализу животног циклуса постројења, као додатак енергетским симулацијама зграда, за формулисање мера енергетске политике итд.

## ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

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

Циљеви постављени у пријави докторске дисертације су у потпуности остварени, као и предложени оквирни садржај дисертације.

У оквиру докторске дисертације, приказана је методологија оптимизације радних параметара енергетских система са когенерацијом или тригенерацијом и складиштењем енергије. Методологија је пре свега погодна за проблеме енергетског снабдевања зграда као потрошача са значајним променама енергетских потреба на дневном и годишњем нивоу. Може се применити и на другачија постројења, нпр. топлане или у индустрији. У циљу демонстрације применљивости методологије приликом оптимизације пројектних параметара енергетских постројења, приказан је веома флексибилан приступ оптимизацији структуре, пројектних и радних параметара, базиран на идентичном математичком моделу.

Приказани приступи оптимизацији радних параметара и свеобухватној оптимизацији структуре, пројектних и радних параметара су примењени на примеру оптимизације система за снабдевање енергијом стамбеног насеља. Илустрована је могућност смањења потрошње примарне енергије и емисије гасова са ефектом стаклене баште у условима карактеристичним за Србију по избору насеља, климатским параметрима, као и ценама енергената и другим улазним подацима. Приказана је значајна и комплексна зависност потрошње примарне енергије и емисије гасова са ефектом стаклене баште од улазних параметара и режима рада. Већи део анализе се се односи на рад постројења у финансијски оптималном режиму. Дефинисани су проблеми вишекритеријумске оптимизације и проблем са два нивоа оптимизације, за чије су решавање коришћене предложене методологије.

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

Обрађивана тема докторске дисертације је веома значајна и актуелна, како у науци, тако и у пракси. Поднета докторска дисертација представља оригиналан и вредан научни и стручни допринос кандидата. Научни допринос разматраног рукописа и објављених радова се пре свега огледа у следећем:

- Дефинисана је методологија оптимизације радних параметара енергетских система са когенерацијом, тригенерацијом и складиштењем топлотне енергије, као и методологија оптимизације структуре постројења, пројектних и радних параметара. Методологија се базира на детаљном математичком моделу који представља синтезу модела присутних у литератури, уз додатна побољшања. Посебан акценат стављен је на аспекте као што су: формулација проблема вишекритеријумске оптимизације и проблема са два нивоа оптимизације, избор критеријума

оптимизације, детаљно разматрање пројектних услова, декомпозиција проблема, могућност комбиновања различитих метода оптимизације итд.

- У циљу примене наведених приступа, развијено је оригинално софтверско решење којим се омогућава дефинисање и решавање проблема оптимизације.
- Вишекритеријумска оптимизација енергетских система је примењена на примеру одређивања ефекта имплементације система са тригенерацијом и складиштењем енергије — финансијских параметара, потрошње примарне енергије и емисије гасова са ефектом стаклене баште. Показано је да ови ефекти значајно зависе од улазних параметара, нпр. цена енергената, као и од избора функција циља, тј. критеријума оптимизације. Поменуте зависности су често комплексне, што је великим делом последица претпоставки везаних за радне режиме. Наглашен је значај разматрања режима рада приликом анализе енергетских система.
- Предложене методе оптимизације су поређене са алтернативним и чешће коришћеним. Показана је њихова применљивост, погодност, флексибилност, тачност, ефикасност, као и могућности и предности комбиновања метода.

Научни значај дисертације примарно чине могућности за спровођење будућих истраживања базираних на оптимизацији енергетских постројења које она доноси, као и демонстрација важности адекватног коришћења оптимизације енергетских система при вредновању резултата њихове имплементације.

Практични значај представља могућност примене приказаних приступа у процесима оптимизације рада постојећих постројења, пројектовања нових енергетских система, као и дефинисања енергетске политике.

#### Оцена самосталности научног рада кандидата *(до 100 речи)*

Кандидат Мирко Стојиљковић је показао значајно теоријско и практично знање, као и висок ниво самосталности, систематичности и креативности у бављењу научно-истраживачким радом. Кандидат је приказао детаљну, свеобухватну и квалитетну анализу постојеће научне литературе из области теме докторске дисертације. Познавање литературе и стечена знања из више области је искористио да на креативан начин осмисли, формулише и примени софистицирани научни приступ оптимизацији енергетских система, заснован на комбиновању различитих метода и детаљном математичком моделу, потенцирајући практичну применљивост. Креирао је софтверско решење које омогућава примену предложених методологија.

Спроведена истраживања је делимично публиковао кроз квалитетне научне радове, објављене у значајним међународним часописима и на међународним конференцијама.

#### **ЗАКЉУЧАК** *(до 100 речи)*

На основу прегледа поднете радне верзије докторске дисертације и увидом у публиковане научне радове кандидата, чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације закључују следеће:

- Поднети рукопис одговара теми докторске дисертације одобреној од стране Наставно научног већа Машинског факултета у Нишу и Научно стручног већа Универзитета у Нишу.
- Докторска дисертација представља оригиналан и вредан научни и стручни допринос веома актуелној и значајној проблематици оптимизације енергетских система.
- Научни допринос и оригиналност дисертације показани су објављивањем већег броја радова у међународним часописима и на међународним конференцијама.
- Докторска дисертација је адекватно конципирана и технички изузетно квалитетно урађена.
- Резултати приказаног научног рада имају висок степен општости и применљивости.
- Кандидат поседује висок ниво теоријских и практичних знања из више области потребних за решавање комплексних проблема оптимизације енергетских система, успешно примењује научне методе и поступке и добро је упознат са досадашњим научним достигнућима.
- Кандидат је показао висок ниво самосталности и систематичности у бављењу научно-истраживачким радом, као и креативан приступ формулацији и решавању разматраних проблема.

Имајући у виду напред наведено, Комисија предлаже Наставно научно већу Машинског факултета у Нишу да се поднети рукопис кандидата **Мирка Стојиљковића**, дипломираног инжењера машинства, под називом:

**„ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА ОПТИМИЗАЦИЈА СИСТЕМА ТРИГЕНЕРАЦИЈЕ ЕНЕРГИЈЕ“**

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

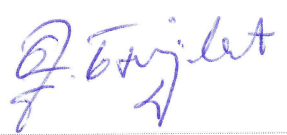


**КОМИСИЈА**

Број одлуке ННВ о именовану Комисије

612-407-6/2015

Датум именовања Комисије

19.06.2015.

Р. бр.	Име и презиме, звање		Потпис
1.	Др Братислав Благојевић, редовни професор Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	ментор, члан 
	Др Душан Гвозденац, редовни професор Термоенергетика и енергетски менаџмент (Научна област)	Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука (Установа у којој је запослен)	
3.	Др Бранислав Стојановић, редовни професор Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	председник 
	Др Дејан Митровић, доцент Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	
5.	Др Раде Карамарковић, доцент Топлотна техника и заштита животне средине (Научна област)	Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу (Установа у којој је запослен)	члан 

Датум и место:

У Нишу, Новом Саду и Краљеву,  
Јули, 2015.





Универзитет у Нишу

---

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

### **Вишекритеријумска оптимизација система тригенерације енергије**

која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

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

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

У Нишу, 23.09.2015.

Аутор дисертације: Мирко Стојиљковић

Потпис аутора дисертације:





Универзитет у Нишу

---

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

Име и презиме аутора: Мирко Стојиљковић

Наслов дисертације: Вишекритеријумска оптимизација система тригенерације енергије

Ментор: Др Братислав Благојевић, редовни професор

Изјављујем да је штампани облик моје докторске дисертације истоветан електронском облику, који сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**.

У Нишу, 23.09.2015.

Потпис аутора дисертације:

A handwritten signature in blue ink, reading 'Mirko M. Stojiljković', written over a horizontal line.





Универзитет у Нишу

---

## ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

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

### **Вишекритеријумска оптимизација система тригенерације енергије**

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

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

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

(Молимо да подвучете само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у Упутству).

У Нишу, 23.09.2015.

Аутор дисертације: Мирко Стојиљковић

Потпис аутора дисертације: