



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



Васко Т. Здравески

**ОПТИМАЛНО ПЛАНИРАЊЕ НА РАДИЈАЛНИ ДИСТРИБУТИВНИ  
МРЕЖИ ПРИ НЕСИГУРНОСТ ВО ПОТРОШУВАЧКАТА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Скопје, 2023

## БЛАГОДАРНОСТ

*Им се заблагодарувам на членовите на Комисијата за оцена и одбрана на оваа докторска дисертација, кои со своите конструктивни забелешки и добронамерни совети помогнаа за подобрување и дооформување на дисертацијата. Голема благодарност му изразувам на Менторот, проф. д-р Мирко Тодоровски, кој несебично ме водеше низ непредвидливиот, а сепак интересен и возбудлив свет на научно истражување.*

*Особена благодарност и изразувам на мојата сопруга Ангела. Честопати се прашувам дали ќе бев во можност да ја исполнам својата желба за заокружување на моето формално образование, без нејзиното разбирање и поддршка. Им благодарам и на моите деца, Димитриј, Михаела и Лена, за нивните насмеани лица со кои успеваат секогаш да ме развеселат. Исто така, чувствувам потреба да им изразам благодарност и на моите родители, Ленче и Трајче, за нивната родителска посветеност и поткрепа во текот на целокупното мое школување.*

Ментор: проф. д-р. Мирко Тодоровски  
Факултет за електротехника и информациски технологии - Скопје

Комисија за оцена и одбрана:

проф. д-р Рубин Талески, претседател  
Факултет за електротехника и информациски технологии – Скопје

проф. д-р Мирко Тодоровски, ментор  
Факултет за електротехника и информациски технологии – Скопје

проф. д-р Весна Борозан, член  
Факултет за електротехника и информациски технологии – Скопје

проф. д-р Александра Крколева Матеска, член  
Факултет за електротехника и информациски технологии – Скопје

проф. д-р Ристо Ачковски, член  
Факултет за електротехника и информациски технологии - Скопје

## СОДРЖИНА

1	ВОВЕД .....	1
2	РОБУСНА ОПТИМИЗАЦИЈА .....	9
2.1	Математичка оптимизација .....	9
2.2	Оптимизација со несигурни податоци .....	10
2.2.1	Видови на несигурност .....	10
2.2.2	Извори на несигурност .....	11
2.3	Решавање на оптимизациски проблеми со несигурни податоци со примена на робусна оптимизација .....	11
2.3.1	Бендеровиот двоен засек .....	12
2.3.2	Додавање на променливи и ограничувања .....	14
2.3.3	Споредба на БДЗ и ДПО алгоритмите .....	16
3	СТОХАСТИЧКИ МОДЕЛ ЗА ОДРЕДУВАЊЕ НА ИНТЕРВАЛОТ НА НЕСИГУРНОСТ .....	18
3.1	Модел за симулирање на дневна крива за полнење на ЕВ .....	19
3.1.1	Обработка на податоци од анкети за транспортните навики на луѓето .....	19
3.1.2	Крива на оптоварување од едно ЕВ .....	21
3.1.3	Крива на оптоварување од група електрични возила .....	24
3.2	Модел за симулирање на дневна производна крива од фотонапонски панели .....	25
3.3	Модел за симулирање на општа потрошувачка на домаќинство .....	26
3.4	Стохастички модел за одредување на интервалот на несигурност .....	28
4	ОПТИМАЛНА СЕЛЕКЦИЈА НА ПРЕСЕКОТ НА ВОДОВИ ВО РАДИЈАЛНА ДИСТРИБУТИВНА МРЕЖА .....	32
4.1	Преглед на научна литература од областа на ОСПВ .....	32
4.2	Дефинирање на проблемот за ОСПВ .....	33
4.3	Оптимизациски метод за ОСПВ во услови на детерминистички моделирана потрошувачка .....	34
4.4	Оптимизациски метод за ОСПВ во услови на несигурна потрошувачка .....	36
4.4.1	Дефинирање на потпроблемот за ОСПВ .....	38
4.4.2	Дефинирање на главниот проблем за ОСПВ .....	39
5	ОПТИМАЛНА КОНФИГУРАЦИЈА НА РАДИЈАЛНА ДИСТРИБУТИВНА МРЕЖА .....	41
5.1	Преглед на научна литература од областа на ОКРДМ .....	41
5.2	Дефинирање на проблемот за ОКРДМ .....	42
5.3	Оптимизациски метод за ОКРДМ во услови на детерминистички моделирана потрошувачка .....	43

---

5.4	Оптимизациски метод за ОКРДМ во услови на несигурна потрошувачка .....	46
5.4.1	Дефинирање на потпроблемот за ОКРДМ .....	48
5.4.2	Дефинирање на главниот проблем за ОКРДМ .....	50
6	ОПТИМАЛНА КОНФИГУРАЦИЈА НА РАДИЈАЛНА ДИСТРИБУТИВНА МРЕЖА – ОПТИМАЛНА ЛОКАЦИЈА И ДИМЕНЗИОНИРАЊЕ НА СТАТИЧНИ БАТЕРИСКИ СИСТЕМИ .....	53
6.1	Преглед на научна литература од областа на ОКРДМ-ОЛДБС .....	53
6.2	Дефинирање на проблемот за ОКРДМ-ОЛДБС .....	54
6.3	Оптимизациски метод за ОКРДМ-ОЛДБС во услови на детерминистички моделирана потрошувачка .....	54
6.4	Оптимизациски метод за ОКРДМ-ОЛДБС во услови на несигурна потрошувачка .....	58
6.4.1	Дефинирање на потпроблемот за ОКРДМ-ОЛДБС .....	60
6.4.2	Дефинирање на главниот проблем за ОКРДМ-ОЛДБС .....	66
7	РЕЗУЛТАТИ – АПЛИКАТИВЕН ДЕЛ .....	69
7.1	Решавање на проблемот за ОСПВ во услови на несигурна потрошувачка .....	71
7.2	Решавање на проблемот за ОКРДМ во услови на несигурна потрошувачка ..	80
7.3	Решавање на проблемот за ОКРДМ-ОЛДБС во услови на несигурна потрошувачка .....	91
8	ЗАКЛУЧОК .....	95
9	РЕФЕРЕНЦИ .....	99

## Номенклатура

### Математички симболи

симбол	опис
$d_{EV}$	Вкупно извозено дневно растојание
$T_i$	Индивидуални патувања
$T_n$	Вкупен број на патувања во текот на еден ден
$P_{ch}^{1p}$	Активна моќност на монофазен полнач на електрично возило
$P_{ch}^{3p}$	Активна моќност на трофазен полнач на електрично возило
$V_{1p}$	Номинален фазен напон
$I_{ch}$	Номинална струја на полнач на електрично возило
$\psi_{ch}$	Ефикасност на полнач на електрично возило
$E_{ch}$	Енергија потребна за целосно полнење на електрично возило
$B_{cap}$	Капацитет на батерија на електрично возило
$T_{ch}$	Време на полнење на електрично возило
$N_{av}$	Среден број на возила по домаќинство
$N_{veh}$	Број на возила во дадена област
$N_{hh}$	Број на домаќинства во дадена област
$N_{EV}$	Број на електрични возила во дадена област
$N_p$	Ниво на пенетрација на електрични возила
$P_{PV}$	Моќност на фотонапонски панел
$G_{sun}$	Сончево зрачење
$A_{PV}$	Кровна површина на која се поставуваат фотонапонски панели
$\psi_{PV}$	Ефикасност на фотонапонски панел
$\psi_{sys}$	Ефикасност на DC/AC системот за преобразување
$A_{PV}^{min}$	Минимална кровна површина
$A_{PV}^{max}$	Максимална кровна површина

$P_{i,j}$	Активна моќност на домаќинство $i$ во временски интервал $j$
$\mu_{i,j}$	Средна вредност за активната моќност на домаќинство $i$ во временски интервал $j$
$\sigma_{i,j}$	Стандардно отстапување на активна моќност на домаќинство $i$ во временски интервал $j$
$N_{HHPV}$	Број на домаќинства кои имаат поставено фотонапонски панели
$N_{PV}$	Ниво на пенетрација на фотонапонски панели
$N_{iter}$	Број на итерации
$S$	Пресек на вод
$r$	Распределена активна отпорност на вод
$x$	Распределена реактивна отпорност на вод
$I_{max}$	Трајно дозволено струјно оптоварување на вод
$n_b$	Број на јазли во мрежата
$g$	Стапка на актуализација за изградба на водови
$g_E$	Стапка на актуализација за поставување на стационарни батериски системи
$v$	Бинарна променлива во форма на матрица
$b$	Бинарна променлива во форма на вектор
$z$	Бинарна променлива во форма на вектор
$l$	Должина на вод
$\alpha$	Фактор на оптоварување
$\beta$	Фактор на загуби
$\lambda_i$	Стапка на испад на водот $i$
$d_i$	Време потребно за поправка на вод $i$
$c_l$	Цена на електрична енергија за kWh
$c_j$	Цена за набавка и поставување на електроенергетски вод
$c_u$	Цена за неиспорачана електрична енергија
$c_{ESS_i}$	Цена за поставување на стационарен батериски систем

$c_{EP}$	Цена на стационарен батериски систем за единица моќност
$c_{EE}$	Цена на стационарен батериски систем за единица енергија
$R$	Концентрирана активна отпорност на електроенергетски вод
$X$	Концентрирана реактивна отпорност на електроенергетски вод
$tg\varphi$	Фактор на реактивна моќност
$V_n$	Номинален напон на дистрибутивна мрежа
$V$	Напон на јазол
$V_s$	Напон на напојниот јазол
$\Delta V$	Загуба на напон во вод
$W_i$	Квадрат од вредноста на напонот за јазол $i$
$U_i$	Разлика од квадратот на напоните на почетниот и крајниот јазол на водот $i$
$P_i$	Активна моќност во електроенергетски вод $i$
$Q_i$	Реактивна моќност во електроенергетски вод $i$
$P_{e_i}$	Врвна активна моќност на стационарен батериски систем приклучен во јазол $i$
$P_{eL_i}$	Активна моќност на стационарен батериски систем во временски сегмент $i$
$P_s$	Активна моќност на напојниот јазол
$\lambda$	Однос помеѓу активната моќност на напојниот јазол и вкупната активна моќност на потрошувачите во мрежата, со вклучени стационарни батериски системи
$\underline{V}$	Минимално дозволена вредност на напонот
$\overline{P}$	Максимално дозволена вредност за активна моќност во вод
$A$	Матрица на инциденција
$P_{d_i}$	Активна моќност на потрошувач приклучен на јазол $i$
$Q_{d_i}$	Реактивна моќност на потрошувач приклучен во јазол $i$
$F_i$	Променлива за линеаризација на изразот $b_i U_i$
$k_{d_i}$	Променлива за линеаризација на изразот $\lambda P_{d_i}$



$t_i$	Променлива за линеаризација на изразот $ P_{d_i} - P_{d_i}^{ref} $
$\mathcal{L}$	Множество од сите гранки во мрежата
$\mathcal{C}$	Множество од сите водови
$\mathcal{B}$	Множество од сите јазли во мрежата
$\mathcal{D}$	Множество од сите потрошувачки јазли во мрежата
$\mathcal{E}$	Множество од сите јазли каде може да биде поставен стационарен батериски систем
$\mathcal{T}$	Множество од сите гранки кои се поврзани со напојната трансформаторска станица
$\mathcal{S}$	Множество од временски интервали потребни за пресметка на енергијата на стационарните батериски системи
$\underline{P}_{d_i}$	Минимална вредност на активна моќност на потрошувач приклучен на јазол $i$
$\overline{P}_{d_i}$	Максимална вредност на активна моќност на потрошувач приклучен на јазол $i$
$\overline{P}_{e_i}$	Максимална вредност на активната моќност на стационарен батериски систем приклучен на јазол $i$
$\underline{P}_{e_i}$	Минимална вредност на активна моќност на стационарен батериски систем приклучен на јазол $i$
$P_{d_i}^{ref}$	Референтна вредност на активна моќност на потрошувач приклучен на јазол $i$
$P_{d_i}^\Delta$	Отстапување на активна моќност на потрошувач приклучен на јазол $i$
$\Gamma$	Буџет на несигурност (анг.: „uncertainty budget“)
$t$	Континуирана променлива за линеаризација на математичка операција апсолутна вредност
$F_i$	Континуирана променлива за линеаризација на множење на бинарна и континуирана променлива
$H_i$	Континуирана променлива за линеаризација на математичка операција апсолутна вредност
$B_i$	Бинарна променлива за линеаризација на математичка операција апсолутна вредност
$M_i$	Голема вредност за моќноста во секој вод $i$
$OBJ_k$	Вредност на функцијата на цел добиена со решавање на потпроблемот во итерација $k$

$ГГВ_k$	Горна гранична вредност добиена со решавање на потпроблемот во итерација $k$
$ДГВ_k$	Долна гранична вредност добиена со решавање на главниот проблем во итерација $k$
$\eta$	Континуирана променлива за решавање на главниот проблем
$\epsilon$	Дозволена грешка во итеративното решавање
$\mu_c$	Ефикасност на полнење/празнење на стационарен батериски систем
$n_l$	Број на гранки во мрежата
$n_b$	Број на јазли во мрежата
$\beta_L$	Фактор на загуби во мрежата
$\alpha$	Лагранжов множител
$\alpha_1$	Лагранжов множител
$\gamma$	Лагранжов множител
$\Delta$	Лагранжов множител
$M^{min}$	Лагранжов множител
$M^{max}$	Лагранжов множител
$\mu^{min}$	Лагранжов множител
$\mu^{max}$	Лагранжов множител
$\theta^{min}$	Лагранжов множител
$\theta^{max}$	Лагранжов множител
$\theta_1^{min}$	Лагранжов множител
$\theta_1^{max}$	Лагранжов множител
$\rho$	Лагранжов множител
$\tilde{\rho}^{min}$	Лагранжов множител
$\tilde{\rho}^{max}$	Лагранжов множител
$\tau$	Лагранжов множител
$\pi$	Лагранжов множител

---

$\nu$	Лагранжов множител
$\nu_1$	Лагранжов множител
$\varphi^{min}$	Лагранжов множител
$\varphi^{max}$	Лагранжов множител

---

## Акроними

кратенка	опис
ОПДС	Оптимално планирање на дистрибутивен систем
ДС	Дистрибутивен систем
ЕВ	Електрични возила
ОИЕ	Обновливи извори на енергија
ДМ	Дистрибутивна мрежа
РО	Робусна оптимизација
БДЗ	Бендеровиот двоен засек (анг.: „Benders-dual cut“)
ДПО	Додавање на променливи и ограничувања (анг.: „Column and constraint generation“)
ОСПВ	Оптимална селекција на пресекот на водовите
ОКРДМ	Оптимална конфигурација на радијална дистрибутивна мрежа
ОКРДМ-ОЛДБС	Оптимална конфигурација на радијална дистрибутивна мрежа и оптимална локација и димензионирање на стационарен батериски систем
СБС	Стационарен батериски систем
СДМ	Среднонапонска дистрибутивна мрежа
МК	Монте Карло
НДМ	Нисконапонска дистрибутивна мрежа
ФП	Фотонапонски панели
СО	Стохастичка оптимизација
РБ	Распаѓање на Бендер (анг.: „Benders decomposition“)
ГГВ	Горна гранична вредност
ДГВ	Долна гранична вредност
ККТ	Каруш-Кун-Такер
МЕВ	Модел за симулирање на дневните потреби за полнење на електрично возило
ГА	Генетски алгоритам

ГИС

Географско информационен систем

---



## 1 ВОВЕД

Примената на оптимизациски алатки во електроенергетскиот систем, како што е при планирањето на нивниот развој и економично работење, е област која и денеска е цел на активни истражувања.

Еден од најчесто истражуваните проблеми во литературата е проблемот на оптимално планирање на дистрибутивни системи (ОПДС), кој како термин се користи за опишување на пошироко множество на проблеми од областа на оптимално планирање. За секој анализиран проблем потребно е да се оптимизира соодветна функција на цел, при што треба да бидат задоволени одредени технички, општествени и ограничувања наметнати од животната средина.

Проблемот за ОПДС е присутен во научното истражување од самиот почеток на електрификацијата на модерните општества. На таа тема е публикуван голем број на трудови во најпознатите списанија од областа на електроенергетиката, во кои се предложени повеќе пристапи за решавање на проблемот. Во општ случај, решавањето на проблемот за ОПДС се заснова на наоѓање на економично, доверливо и сигурно решение кое ги задоволува сите дефинирани ограничувања.

Во изминатите две децении, сведоци сме на постепена транзиција на дистрибутивните системи (ДС). Задачата на традиционалните ДС е да ја дистрибуираат електричната енергија од преносната мрежа до крајните потрошувачи (домаќинствата и индустријата). Оваа улога на ДС постепено се менува преку интегрирање на електрични возила (ЕВ) и производство на електрична енергија од обновливи извори на енергија (ОИЕ).

Тешкотиите при решавањето на проблемот за ОПДС произлегуваат од фактот што современите ДС имаат голем број на елементи. Дополнително, функцијата на цел со која се опишува анализираниот проблем може да биде нелинеарна и неконвексна, како и фактот дека дел од променливите во проблемот се дискретни. Воведување на нова променлива изразена преку несигурност во потрошувачката на електрична енергија, дополнително го усложнува проблемот за ОПДС. Воведувањето на оваа несигурна променлива е поттикната од желбата на широката популација за заштита и зачувување на животна средина. Со цел ублажување и прилагодување на климатските промени, во рамките на Рамковната конвенција на Обединетите нации за климатски промени, од страна на 192 држави беше потпишан Договорот од Париз [1]. Согласно Договорот, земјите потписнички преземаат обврски кон задржување на зголемувањето на глобалната температура под 2 °C над прединдустриското ниво. Како директна обврска на Договорот од Париз е изгласан новиот Закон за енергетика и од страна на Владата е донесена Стратегија за развој на енергетиката на Република Северна Македонија [2]. Стратегијата дефинира пет енергетски столбови и разработени се три сценарија за развој на енергетската заедница до 2040 година: референтно сценарио, сценарио за умерена транзиција и зелено сценарио. Од аспект на електроенергетиката, најзначаен е третиот енергетски столб кој се однесува на декарбонизација. Согласно препораките од стратегијата, потребно е да се имплементираат следните насоки кои се однесуваат на столбот декарбонизација:

- стимулирање на ОИЕ за производство на електрична енергија преку повластени тарифи и премии со аукции,
- зголемен удел на ЕВ преку финансиски стимулации за купување на ЕВ,

- изградба на потребната инфраструктура за полнење на ЕВ на национално и локално ниво.

Субвенционирањето на употребата на ЕВ и ОИЕ, како директна препорака од Договорот од Париз, со сигурност ќе доведе до нивно зголемено присуство во нашето општество. Ваквиот начин на субвенционирање ќе ја забрза транзицијата на ДС, од пасивни во активни учесници во нашиот електроенергетски систем. Непредвидливоста во полнењето на ЕВ, како и непредвидливоста во производството на електрична енергија од ОИЕ, ќе доведе до несигурност во прогнозата на врвното оптоварување во дистрибутивната мрежа (ДМ) и дополнително ќе го усложни процесот на нивно оптимално планирање [3], [4], [5].

Основен податок, потребен за оптимално планирање кое ќе ги задоволи идните потреби на корисниците на ДС, е прогнозата на потрошувачка на електрична енергија која ќе се реализира во иднина. Досегашните алатки со кои се врши прогноза на идната потрошувачка се засноваат на методи кои во себе вклучуваат повеќе показатели за периодот од интерес. Дел од тие показатели се: прогноза за стапката на прираст на населението, прогноза за растот на економијата, податоци за очекувани капитални инвестиции во дадена област и слично. Со зголемување на интеграцијата на ЕВ и ОИЕ, сè повеќе се зголемува и несигурноста во прогнозата на целокупното оптоварување во ДС. Таа несигурност се должи на непредвидливоста која е присутна во начинот на користење на ЕВ, како и на непредвидливоста на метеоролошките дневни промени кои влијаат врз количеството на произведена електрична енергија од ОИЕ. Во понатамошниот текст, оваа несигурност ќе ја нарекуваме несигурна потрошувачка.

Во научната литература се издвојуваат два методи за справување со несигурната потрошувачка, како потесен дел од решавањето на општиот проблемот за ОПДС: стохастички метод и метод со решавање на повеќе сценарија.

Главна карактеристика на стохастичките методи е претпоставката дека кривата на распределба со која се опишува несигурната потрошувачка (или кривите на распределба на влезните податоци од кои зависи несигурната потрошувачка) е позната или барем делумно позната. Најчесто, сончевото зрачење се моделира со Бета дистрибуција, брзината на ветерот се верува дека ја следи Веибуловата дистрибуција, а општата потрошувачка на електрична енергија на домаќинствата со нормална Гаусова распределба [6], [7], [8], [9]. За голем број на оптимизациски проблеми, кривите на распределба на несигурните податоци е тешко да се одредат. Во тој случај, за една иста класа на податоци се користат две или повеќе еднородни криви на распределба со различни вредности за соодветните коефициенти. Доколку се решава проблем со голем број на променливи, како што е проблемот за ОПДС, за секоја од несигурните променливи е потребно да се одреди кривата на распределба со што се зголемува компјутерското време потребно за пресметка.

Методите со решавање на повеќе сценарија се базираат на прогнозирање на повеќе клучни податоци и разработка на сценарија со различни фактори на несигурност. Носечки елементи на факторот на несигурност се: брзината на ветерот, сончевото зрачење и општата потрошувачка на електрична енергија. Потоа, податоците дефинирани во секое од сценаријата се користат за повеќекратно решавање на проблемот за ОПДС. Очигледно е дека со зголемување на факторот на несигурност на влезните податоци, се зголемува и бројот на клучни сценарија кои треба да се анализираат, а со тоа се зголемува и компјутерското време потребно за пресметки и добивање на резултати. Некои научни трудови вршат намалување на сценаријата со цел намалување на пресметковното време [10], [11]. Друг пристап за намалување на



---

пресметковното време е преку избирање на репрезентативни сезонски сценарија со кои се опишува карактеристичната сезонска флукуација во производството на електрична енергија од ОИЕ и општата потрошувачка на електрична енергија [12], [13]. Како резултат на редуцираниот број на карактеристични сценарија се намалува пресметковното време за сметка на добиената точност.

Откако е одреден методот за вклучување на несигурната потрошувачка во проблемот за ОПДС, во научната литература се среќаваат два главни пристапи за неговото решавање: математичко програмирање и еволутивни хеуристички алгоритми.

Методите кои спаѓаат во класата на математичко програмирање, а притоа се користат за решавање на ОПДС, се: мешано целобројно програмирање, нелинеарно програмирање, динамичко програмирање и директно програмирање. Најчесто користена метода за решавање на проблемот за ОПДС е мешано целобројно програмирање [14], [15], [16]. Доколку постои потреба за уважување на трошоците за загуба на електрична енергија поради тековите на реактивни моќности низ водовите, се јавува потреба од дефинирање на дел од изразите со нелинеарни ограничувања. Во тој случај, потребно е да се воведат некои упростувања на моделот на мрежата со цел применливост на методот на мешано целобројно програмирање во решавање на проблемот за ОПДС.

Во класата на еволутивни хеуристички методи спаѓаат: генетски алгоритам, оптимизација базирана на рој честички, систем на колонија на пчели и други. Најчесто употребуван хеуристички метод за решавање на проблемот за ОПДС е генетскиот алгоритам [17], [18], [19]. Генетскиот алгоритам се развива како биолошки пристап кон оптимизацискиот процес. Тие се состојат од популација од низи од променливи (гени) кои се трансформираат во три генетски оператори: селекција, вкрстување и мутација. Главната предност на генетскиот алгоритам е во тоа што толерираат нелинеарни проблеми во кои се вклучени и дискретни променливи. Тоа ги прави попривлечни за научната заедница во однос на методите застапени во класата на математичко програмирање. Главниот недостаток на ГА е во неговото дефинирање, односно од потребата за енкодирање и декодирање на променливите.

Во овој докторат, ќе бидат развиени три нови оптимизациски методи за решавање на поединечни проблеми од пошироката област за ОПДС, базирани на робусна оптимизација (РО). Целта е да се надминат проблемите кои произлегуваат од начинот на кој е дефинирана и опишана несигурната потрошувачка во постојната литература.

Во математичките и инженерските науки, РО се користи за решавање на оптимизациски проблеми во кои има несигурност во влезните податоци. Начинот на опишување на несигурните податоци е поедноставен и поефикасен во споредба со методите кои се среќаваат во литературата, како што се: стохастичките методи и методите со решавање на повеќе сценарија. Во РО, несигурните податоци се опишуваат со интервал составен од две гранични вредности, кој се нарекува интервал на несигурност [20]. При решавање на проблем од областа на ОПДС со примена на РО, доволно е несигурната потрошувачка во секој јазол од ДМ да се опише со интервал на несигурност, односно со максимална и минимална врвна моќност која би можела да се приклучи на соодветниот јазол. Бидејќи на тој начин несигурната потрошувачка е опишана само со две карактеристични вредности, големината на ДМ не влијае значително врз компјутерското време потребно за решавање на анализираниот проблем.

Некои научници тврдат дека оптимизациските методи кои се засноваат на РО имаат тенденција да бидат претерано конзервативни [21]. Односно, вредноста добиена за функцијата на цел е непотребно повисока. За да се надмине овој проблем,

математичарите ја развиваат дво-фазната РО, која во литературата е позната уште и како адаптивна РО [22]. Адаптацијата се состои во тоа што покрај класичното пребарување на минимална вредност од функцијата на цел, аналитички се изведува потпроблем во кој е дефинирана нова функција на цел од која се бара максимална вредност. На тој начин, се дефинира дво-фазна РО која се означува со „min max“ во функцијата на цел. Оттаму доаѓа и епитетот дво-фазна РО. Главна предност на адаптивната РО е во тоа што несигурниот влезен податок во потпроблемот се дефинира како променлива. На тој начин, со решавање на потпроблемот се добива вредност за несигурната променлива која ја претставува најнеповолната распределба од истата, односно, се добива решение за кое сме сигурни дека е оптимално, дури и при најнеповолна распределба на несигурните податоци.

Во литературата постојат два алгоритми за решавање на општ математички проблем од класата на адаптивна РО: Бендеровиот двоен засек (БДЗ) и алгоритмот со додавање на променливи и ограничувања (ДПО) [23]. За развивање на трите оптимизациски методи од областа на ОПДС, во оваа докторска дисертација ќе се употреби ДПО алгоритмот, бидејќи е поефикасен во споредба со БДЗ. Другите предности на ДПО алгоритмот во однос на БДЗ алгоритмот се дадени во потпоглавје 2.3.3.

Во докторатот се развиени три нови оптимизациски методи за решавање на три потесни проблеми од пошироката област на ОПДС: оптимална селекција на пресекот на електроенергетски водови (ОСПВ), одредување на оптимална конфигурација на радијална дистрибутивна мрежа (ОКРДМ) и одредување на оптимална конфигурација на радијална дистрибутивна мрежа и оптимална локација и димензионирање на статични батериски системи (ОКРДМ-ОЛДБС). Како појдовна точка за развивање на оптимизациски методи за решавање на проблемите за ОСПВ, ОКРДМ и ОКРДМ-ОЛДБС во услови на несигурна потрошувачка, најпрво се развиени оптимизациски методи кои се базираат на математичката оптимизација мешано целобројно програмирање, во кои потрошувачката е моделирана со детерминистички вредности.

Првиот оптимизациски метод развиен во докторатот може да се примени за ОСПВ во ДМ независно од напонското ниво на истата. Исто така, методот не прави разлика дали ДМ е кабелска или надземна. Во овој докторат ќе се анализира случај на примена на оптимизацискиот метод за ОСПВ за планирање на среднонапонска ДМ (СДМ).

Од аспект на периодот на планирање, развиениот метод за решавање на проблемот за ОСПВ спаѓа во класата на среднорочни планирања на мрежата. Општо е познато дека проблемот за ОСПВ се применува за одредување на пресекот на водовите за ДМ со позната топологија. Развиениот оптимизациски метод може да се примени и за одредување на пресекот на водовите во услови на проширување на веќе постоечка мрежа, каде е позната топологијата на дополнителниот дел од мрежата. Таквиот начин на употреба на оптимизацискиот метод припаѓа во класата на краткорочни планирања на ДМ.

Функцијата на цел за проблемот на ОСПВ ќе биде така дефинирана да се минимизираат капиталните трошоци за изградба на мрежата, како и минимизирање на оперативните трошоци поради загуби на електрична енергија. Трошоците се пресметуваат за период од една година. Во оптимизацискиот метод се вклучени и ограничувања за максимално дозволени загуби на напон во ДМ. Ова е особено важно од аспект на квалитетот на испорачана електрична енергија. Исто така, се води сметка и за билансот на моќности.

Несигурната променлива е дефинирана со соодветен интервал на несигурност, со максимална и минимална вредност за активна моќност во секој јазол од СДМ. Системската променлива во развиениот оптимизациски метод е бинарна. Таа е во форма на матрица со број на редици колку што има гранки во ДМ и број на колони кој зависи од бројот на расположливи кабли со различен пресек кои можат да се употребат при изградба на мрежата. Бидејќи развиениот метод се заснова на мешано целобројно програмирање, се јавува потреба од множење на бинарната системска променлива со континуирана променлива. Ваквото множење е нелинеарно и истото е линеаризирано со воведување на нова континуирана променлива.

Вториот оптимизациски метод развиен во докторатот служи за одредување на ОКРДМ од множество на можни патеки во новопланирана ДМ. Методот може да се примени за планирање на надземна или кабелска мрежа. Од аспект на периодот на планирање, оптимизацискиот метод спаѓа во класата на долгорочни планирања и истиот може да се употреби за планирање на нисконапонски или среднонапонски радијални мрежи. Исто како и во методот за ОСПВ, и методот за ОКРДМ може да се адаптира со цел негова примена за оптимално проширување на постоечка ДМ.

Функцијата на цел е дефинирана да се минимизираат капиталните трошоци за изградба на мрежата, минимизирање на трошоците за неиспорачана електрична енергија поради евентуален испад на некој од водовите, како и минимизирање на трошоците поради загуби на електрична енергија во мрежата. Трошоците во функцијата на цел се пресметуваат во период од една година. Во оптимизацискиот метод се вклучени ограничувања кои се однесуваат на квалитетот на испорачана електрична енергија, односно ограничувања кои се однесуваат на максимално дозволените загуби на напон во мрежата. Понатаму, воведени се и ограничувања од техничка природа кои се однесуваат на максимално дозволеното струјно оптоварување на водовите, како и ограничување за добивање на радијална конфигурација. Секако, вклучени се и ограничувањата кои се однесуваат на балансот на моќности.

Исто како кај оптимизацискиот метод за ОСПВ, и во методот за ОКРДМ несигурната променлива е дефинирана со соодветен интервал на несигурност, претставен преку соодветни гранични вредности за ангажираната активна моќност во секој јазол од СДМ. Системската променлива која одлучува која гранка ќе биде вклучена во финалното решение е бинарна. Таа е во форма на вектор со димензија еднаква на бројот на гранки од кои треба да се одбере конечната радијална конфигурација. Бидејќи системската променлива е бинарна, а во самиот проблем има ограничувања во кои има множење на системската променлива со некоја континуирана променлива, тој израз е соодветно линеаризиран. Во општ случај не сме заинтересирани за насоката на моќноста во вод од радијалната мрежа и затоа во функцијата на цел се воведува математичката операција апсолутна вредност. Бидејќи апсолутната вредност како математичка функција не е диференцијабилна, истата е упростена со воведување на дополнителна континуирана променлива.

Согласно податоците достапни во литературата, во последната деценија честа е појавата на поставување на статични батериски системи (СБС) во ДМ. Постојат повеќе придобивки од таквата активност, меѓу кои најзначајни се: можност за чување на вишок произведена електрична енергија од ОИЕ и нејзино користење кога за тоа има потреба, регулација на напон, регулација на фреквенција и слично. Од тие причини во докторатот е извршено проширување на оптимизацискиот метод за ОКРДМ, каде покрај одредување на оптимална топологија на СДМ, оптимално се одредува и локацијата во мрежата каде може да се постават СБС. Исто така, методот нуди можност за одредување

на оптимална моќност и енергија на поставените батериски системи. На тој начин е развиен нов оптимизациски метод за решавање на проблемот за ОКРДМ-ОЛДБС.

Оптимизациските методи за решавање на проблемот за ОСПВ и ОКРДМ, припаѓаат во класата на дво-фазна адаптивна РО. За разлика од нив, оптимизацискиот метод за решавање на ОКРДМ-ОЛДБС припаѓа во класата на три-фазна адаптивна РО. Покрај „min“ делот кој има за цел да ја пребара минималната вредност од функцијата на цел, „max“ делот со кој се одредува најнеповолната распределба на несигурната променлива, се воведува и дополнителен „min“ дел во функцијата на цел кој се однесува на одредување на оптимална локација и димензионирање на СБС.

Најпрво е потребно да се прилагоди три-фазната РО во дво-фазна РО. Тоа се постигнува со следење на принципите на дуално програмирање, поточно со усвојување на Каруш Кун Такер (ККТ) условите за слаба дуалност, кои се применуваат врз ограничувањата од третата „min“ фаза. На тој начин е извршена трансформација во дво-фазна РО која се решава со адаптација на итеративниот ДПО алгоритам.

Во функцијата на цел во ОКРДМ-ОЛДБС се вклучени годишните капитални трошоци за изградба на СДМ, трошоците поради загуби на електрична енергија во мрежата и капиталните годишни трошоци за поставување на СБС. Како и во претходните два оптимизациски методи, несигурната променлива е претставена со соодветен интервал на несигурност, преку соодветни гранични вредности за врвната ангажирана активна моќност во секој јазол од СДМ. Во проблемот се дефинирани две системски бинарни променливи. Првата е во облик на вектор со димензија еднаква на бројот на гранки и одлучува која од гранките ќе биде вклучена во конечната топологија на СДМ. Втората бинарна системска променлива е исто така во облик на вектор со димензија еднаква на бројот на јазли во СДМ, која одлучува во кој јазол од СДМ треба да се постави СБС.

Во докторатот особено внимание се посветува на интервалот на несигурност. Од членовите на интервалот се одредува вредноста на несигурната променлива. Несигурната променлива во ОСПВ, ОКРДМ и ОКРДМ-ОПДСБ е дефинирана како ангажирана активна моќност во јазлите од СДМ. За моделирање на граничните вредности од интервалот на несигурност е развиен нов стохастички модел на потрошувач од типот домаќинство заснован на Монте Карло (МК) методот.

Секој јазол од СДМ напојува нисконапонска ДМ (НДМ) преку соодветна трансформатор среден на низок напон. Во докторатот се анализира случај во кој во НДМ се приклучени само потрошувачи од типот домаќинство. Доколку во домаќинствата од НДМ има приклучено ЕВ и дисперзирано производство на електрична енергија базирано на технологии на ОИЕ, врвната моќност со која нисконапонската мрежа ја оптоварува среднонапонската е тешко да се предвиди. Исто така, потребно е да се земе предвид и варијацијата во општата потрошувачка на домаќинствата. Бидејќи веројатноста за поставување на ветерна централа за производство на електрична енергија во едно домаќинство е мала, влијанието на ОИЕ ќе се уважи само со моделирање на производство на електрична енергија од фотонапонски панели (ФП).

Новоразвиениот стохастички модел со чија помош се моделира потрошувачката на електрична енергија, односно се одредуваат вредностите од интервалот на несигурност, се состои од три засебни модели за одредување на еквивалентна кумулативна дневна крива на потрошувачка во дадена НДМ, составена од сите домаќинства приклучени на истата. Првиот модел служи за симулирање на дневните потреби за полнење на ЕВ. Вториот модел служи за симулирање на производна крива од

ФП. Третиот модел служи за симулирање на кривата на потрошувачка на потрошувач од типот домаќинство. Со примена на трите модели, за секое од домаќинствата во НДМ се генерираат: крива на оптоварување од општа потрошувачка, крива на оптоварување од ЕВ (доколку домаќинството поседува ЕВ) и производна крива од ФП (доколку домаќинството поседува ФП). Со примена на Њутн-Рафсоновиот метод, во 15 минутни интервали, се врши пресметка на тековите на моќност во НДМ. Како резултат од пресметката на тековите на моќност се добива и кумулативната крива на оптоварување за трафостаницата среден на низок напон. Преку анализа на кумулативната крива на оптоварување се добива врвната моќност со која НДМ ја оптоварува СДМ во соодветниот јазол.

Во литературата, дневните енергетски потреби на ЕВ се моделираат преку нормална Гаусова распределба. Во докторатот ќе биде напуштена стандардната процедура која се користи во литературата за симулирање на енергетските потреби на ЕВ и ќе биде воведен нов пристап каде што ЕВ се симулираат со користење на податоци достапни во анкети кои ги истражуваат транспортните навики на луѓето.

Производната крива од ФП ќе се симулира согласно достапните податоци во литературата за сончевото зрачење на територија на град Скопје. Со цел воведување на несигурност во врвната моќност произведена од ФП, расположливата површина од кровната конструкција на која се поставени ФП во едно домаќинство е случајно избрана.

Варијацијата во моделот за општа потрошувачка на домаќинствата се постигнува со воведување на нормална Гаусова распределба. Кривата на оптоварување за секое домаќинство од НДМ се симулира со различна средна вредност за секој од 15 минутните временски интервали.

Бројот на домаќинства кои се приклучени на НДМ е основниот податок потребен за реализација на стохастичкиот модел за одредување на интервалот на несигурност. Бројот на домаќинства кои поседуваат ЕВ и/или ФП се одредува согласно претходно дефинирано ниво на пенетрација. Во секоја МК итерација, за секое домаќинство, се пресметува еквивалентната крива на оптоварување во функција од: дневните енергетските потреби за полнење на ЕВ, дневната производна крива на ФП и кривата на потрошувачка на домаќинствата. Во истата итерација, со примена на Њутн-Рафсоновиот метод се одредува и еквивалентната крива на оптоварување за целата НДМ.

Со избирање на доволно голем број на итерации, се прави обид за опфаќање на сите можни карактеристични комбинации со цел симулирање на кривите на потрошувачка за кои настанала минималната и максималната врвна моќност. Во докторатот е направена анализа и за потребниот број на МК итерации за кои се постигнува уточнување на минималната и максималната вредност на врвна моќност. На тој начин, интервалот на несигурност со кој се опишува ангажираната активна моќност во јазлите од СДМ е дефиниран со доволна точност.

Докторската дисертација е структурирана во осум поглавја. Поголавје 1 претставува вовед во проблематиката на оптимално планирање на дистрибутивните системи во кои има зголемено присуство на несигурна потрошувачка. Во поглавје 2 е прикажан теоретскиот дел потребен за опишување на општ проблем од областа на робусна оптимизација. Во истото поглавје се презентирани и два карактеристични алгоритми кои се користат за решавање на општ проблем од областа на робусна оптимизација. Во поглавје 3 е презентираан стохастички модел за симулирање на потрошувачка и одредување на интервалот на несигурност дефиниран преку минимална и максимална ангажирана врвна моќност. Аналитичко изведување на математичките

релации за опишување и решавање на методот за ОСПВ во радијална ДМ со позната топологија, како и на методот за ОКРДМ, е презентираан во поглавје 4 и поглавје 5 соодветно. Во поглавје 6 е презентираан нов метод со која е извршено проширување на проблемот за ОКРДМ преку вклучување на соодветни ограничувања за оптимално поставување и димензионирање на СБС во ДМ. Во поглавје 7 се презентираани резултатите од компјутерските пресметки со кои се потврдува валидноста на развиените методи, а во поглавје 8 е даден заклучокот за сработеното и презентираани се насоки за идни истражувања.

## 2 РОБУСНА ОПТИМИЗАЦИЈА

### 2.1 Математичка оптимизација

Процесот на оптимизација се труди да ја постигне посакуваната цел на најдобриот можен начин и токму затоа е главен чинител во секој процес на одлука за даден индустриски предизвик. Покрај во инженерството, оптимизациските проблеми се обработуваат и во други научни области како што се: економија, математика, компјутерски науки, логистички и транспортни проблеми. Најчесто, проблемот од интерес е дефиниран со познат број на технички и системски ограничувања. Оптимизацијата, во поширока смисла на зборот, често се употребува и во секојдневниот живот на луѓето, кои со своето делување се обидуваат да го постигнат најдоброто за себе и своите најблиски, почитувајќи одреден број на персонални и општествени ограничувања. Со користење на оптимизација за проблемот кој се анализира се добиваат квантитативни сознанија. Ова му овозможува на корисникот да го спореди добиеното решение со други можни решенија и да одлучи кое од добиените резултати е најоптимално.

Во науката, процесот на оптимизација се нарекува уште и математичка оптимизација или математичко програмирање. Математичката оптимизација е основен чинител во секој проблем кој се решава со примена на робусна оптимизација.

Во општа форма, оптимизацискиот проблем може да се претстави со следната релација:

$$\min_x f(\mathbf{x}_n) \quad (2.1)$$

Со ограничување:

$$\mathbf{Ax} \leq \mathbf{u}. \quad (2.2)$$

Најголемиот број на оптимизациски проблеми вклучуваат три главни елементи:

- **променливи**  $\mathbf{x}_n$  чија вредност се добива при решавање на оптимизацискиот проблем. Со  $n$  е означен бројот на променливи кои се употребуваат во решавањето. Во секој оптимизациски проблем има барем една променлива. Во спротивно, не би постоел оптимизациски проблем за решавање;
- **функцијата на цел**  $f(\mathbf{x}_n)$  чија квантитативна вредност зависи од добиената вредност за променливите  $\mathbf{x}_n$ . Вредноста на функцијата на цел претставува квантитативно мерило за тоа колку „добро“ е добиеното решение. Во зависност од потребите, целта на оптимизацијата може да биде да се најде минимум или максимум од функцијата на цел;
- **ограничувања** прикажани во изразот (2.2) кои можат да бидат од типот на равенство или неравенство. Со нив се опишуваат техничките, економските, физичките или други ограничувања на анализираниот проблем. Ограничувањата го дефинираат **просторот за пребарување** кој ги содржи сите дозволени вредности на променливите. Секое ограничување е дефинирано со **параметрите**  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{u}$ .

Во последните 50 години, се развиени неколку гранки од областа на математичка оптимизација. Разликите помеѓу различните гранки од областа на математичко програмирање зависи од структурата на оптимизацискиот проблем и математичката

природа на функцијата на цел и на ограничувањата. Најзастапени гранки од областа на математичко програмирање, кои може да се искористат за развој на оптимизациски метод кој припаѓа во класата на робусна оптимизација се:

- **линеарно програмирање:** функцијата на цел и ограничувањата се линеарни функции;
- **целобројно програмирање:** во одредени проблеми кои се решаваат со примена на линеарно програмирање се јавува потреба променливите да припаѓаат во множеството на цели броеви. Кога во ист проблем опишан со линеарно програмирање, дел од променливите се реални, а дел цели броеви, тој проблем се нарекува **мешано целобројно програмирање**;
- **квадратно програмирање:** функцијата на цел е квадратна функција, а ограничувањата се линеарни;
- **нелинеарно програмирање:** функцијата на цел, како и ограничувањата, се нелинеарни функции. Алгоритмите кои се користат за решавање на проблеми од областа на нелинеарно програмирање, може да се искористат и за решавање на проблеми од областа на линеарно;
- **динамичко програмирање:** во голем број на оптимизациски проблеми, серија на одлуки мора да бидат донесени секвенцијално, притоа одлуките од различни секвенци влијаат една на друга. Во таков случај, серија на оптимизациски процедури (засновани на било која од претходно дефинираните гранки од математичко програмирање) мора да бидат извршени со цел добивање на глобално оптимално решение.

## 2.2 Оптимизација со несигурни податоци

### 2.2.1 Видови на несигурност

Голем број на реални оптимизациски проблеми во себе содржат одредена несигурност. Се очекува решението на таквиот оптимизациски проблем да биде робусно во однос на несигурните податоци. Најчесто, целта е да се добие решение чиешто перформанси се робусни во однос на негативните ефекти на варијацијата на несигурните податоци. Според [24], несигурноста во влезните податоци се дефинира како разлика помеѓу очекуваната односно прогнозираната вредност и идната реализирана вредност.

Согласно литературата [25], а во однос на начинот на настанување на несигурните податоци, постојат три видови на несигурност:

- **Епистемична** несигурност во податоците се јавува поради недостаток на суштинско познавање на проблематиката која се моделира/анализира. Во овој тип на несигурност на влезните податоци се вклучени: поедноставувањето во моделирањето, недоволно познавање на анализираниот систем, човечки грешки и непредвидливата интеракција на добро моделираните влезни податоци.
- **Алеаторна** несигурност која е вградена во самата природа на влезниот податок. Иако влезниот податок може да биде прецизно дефиниран со свои гранични вредности и/или дистрибуција, сепак неговата вредност може да варира надвор од правилата со кои е дефиниран.
- **Двосмисленост:** несигурност во податоците која се јавува како резултат на користење на јазични норми за опишување на реални системи. Најчесто ваквата несигурност на податоците се јавува поради недоразбирање во интерпретацијата на податоците и/или системот кој се опишува.



## 2.2.2 Извори на несигурност

Пред имплементација на потенцијалното решение од анализираниот проблем, за да ја процени неговата валидност, проектантот ги има на располагање добиените резултати од одреден број на симулации добиени со решавањето на математичкиот модел со кој е претставен анализираниот проблем. Како што е прикажано на сликата 2.1, математичкиот модел дава претпоставка за перформансот на потенцијалното решение, базирано на променливите и параметрите кои ги претставуваат влезните податоци во самиот модел [26]. Математичкиот опис на оваа зависност може да се дефинира како:

$$f = f(\mathbf{x}_n, u), \quad (2.3)$$

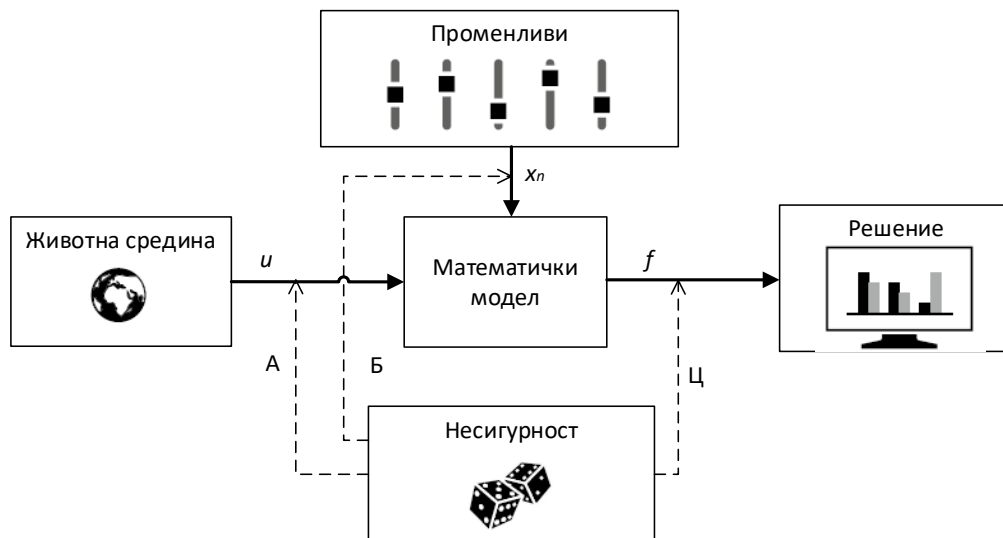
каде  $f$  претставува мерка за точноста на решението добиено од креираниот математички модел, а  $\mathbf{x}_n$  и  $u$  ги претставуваат променливите и параметрите дефинирани со (2.2). Несигурноста е присутна во секој елемент од сликата 2.1, и согласно [26], постојат три извори на несигурност во еден математички модел:

- **Тип А:** несигурност во параметрите кои ја опишуваат животната средина во која треба да се имплементира добиеното решение, која се јавува како резултат на недоволните податоци за истата. Овој вид на несигурност, најчесто се моделира со користење на произволни вредности за опишување на несигурниот параметар  $u$  во изразот (2.3).
- **Тип Б:** несигурност во производните параметри на елементите кои се користат во финалниот дизајн и промената на нивните перформанси поради стареење. Овој вид на несигурност потекнува од променливата  $\mathbf{x}_n$  во изразот (2.3), која ги претставува техничките својства на елементите кои се употребуваат во финалното решение од анализираниот проблем.
- **Тип Ц:** несигурност во добиеното решение од моделирањето. Точноста на решението  $f$  добиено со математичко моделирање на анализираниот проблем, најчесто се разликува од точното решение поради недоследности во моделирањето. Грешките во моделирањето најчесто се јавуваат поради поедноставување на зависноста помеѓу променливите и параметрите. Овој вид на несигурност е последица на недоволно разбирање на појавата која се моделира, или поради планирано поедноставување на моделот (како на пример линеаризација на некој неконвексен израз), со цел поедноставување на моделот и намалување на пресметковното време потребно за негово решавање. Овој вид на несигурност потекнува од точноста на решението  $f$  од изразот (2.3).

## 2.3 Решавање на оптимизациски проблеми со несигурни податоци со примена на робусна оптимизација

Во областа на математичко програмирање постојат два пристапи за решавање на оптимизациски проблеми со несигурни параметри, стохастичка оптимизација (СО) и РО [27]. Во СО, несигурните параметри се претставени со претходно дефинирана распределба (на пример: нормална Гаусова распределба, Веибулова распределба и други). Најчесто, за да се одредат параметрите на распределбата потребно е да се одредат еднозначни вредности кои се добиваат по пат на решавање на карактеристични сценарија за анализираниот проблем [28]. Прецизно одредување на параметрите на распределбата е еден од главните недостатоци на СО [27]. За одредени проблеми кои се анализираат, потребни се повеќе од една распределба за соодветно претставување на несигурните податоци. Вклучувањето на повеќе распределби за еден ист параметар, ја

зголемува комплексноста на проблемот, а воедно го зголемува и компјутерско време потребно за пресметка.



Слика 2.1 Извори на несигурност [25]

Споредбено со СО, кај РО несигурните параметри се дефинирани со таканаречениот интервал на несигурност. Овој начин на моделирање на несигурните податоци е поефикасен во споредба со распределбите кои се користат во СО [20]. Некои научни трудови предупредуваат дека решенијата добиени со РО се премногу конзервативни, односно, решенијата добиени со РО се непотребно предимензионирани [21]. За да се надмине конзервативноста на добиеното решение, авторите на [22] го развиле методот на адаптивна РО.

Од литературата може да се издвојат два математички алгоритми за решавање на проблеми од областа на адаптивна РО: БДЗ и ДПО алгоритмот [29]. И двата алгоритми изискуваат итеративно решавање.

### 2.3.1 Бендеровиот двоен засек

Во ова потпоглавје ќе биде презентирани метод за решавање на РО базирана на линеарно програмирање со примена на БДЗ алгоритмот. Со дополнителни модификации, БДЗ може да се приспособи за решавање на оптимизација од нелинеарно програмирање. Интервалот на несигурност на параметрите може да биде дефиниран со две дискретни вредности или со полиедар.

Општата форма на дво-фазна адаптивна РО може да се запише како:

$$\min_y c^T y \quad \max_{u \in U} \min_{x \in f(y,u)} b^T x. \quad (2.4)$$

Со ограничувања по  $y$ :

$$Ay \geq d, \quad (2.5)$$

$$y \in S_y, \quad (2.6)$$

и ограничувања по  $x$ :

$$Gx \geq h - Ey - Mu, \quad (2.7)$$

$$x \in S_x, \quad (2.8)$$

каде  $\mathbf{y}$  е променливата од првата фаза од оптимизацијата,  $\mathbf{x}$  е променливата од втората фаза од оптимизацијата,  $u$  е несигурниот параметар, сетот од вредности  $\mathbf{S}_y \subseteq \mathbb{R}_+^n$  и сетот од вредности  $\mathbf{S}_x \subseteq \mathbb{R}_+^m$ . Во општ случај, променливите  $\mathbf{y}$  и  $\mathbf{x}$  може да бидат бинарни или континуирани. Бидејќи алгоритмот за решавање на овој РО проблем користи дуално програмирање (со кое дуалните променливи од втората фаза се користат при решавањето на првата), а воедно е заснована и на методата на Распаѓањето на Бендер (РБ), овој алгоритам уште се нарекува и Бендеровиот дуален метод [23]. Решавањето на БДЗ се заснова на итеративна постапка според која главната функција на цел опишана со изразот (2.4) се дели на два проблеми: главен проблем и потпроблем.

Доколку со  $\pi$  ги означиме дуалните променливи на  $\mathbf{x}$ , тогаш со помош на дуално програмирање можеме да ја определеме дуалната функција на цел на втората фаза од РО. На тој начин, доаѓа до спојување на максимизацијата на несигурната променлива  $u$  и дуалната функција на променливата  $\mathbf{x}$  изразена преку дуалната променлива  $\pi$ . Со спојувањето на овие две максимизациони функции на цел е дефиниран потпроблемот во БДЗ методата, опишан со изразот:

$$\max_{u, \pi} (\mathbf{h} - \mathbf{E}\mathbf{y} - \mathbf{M}u)^T \pi. \quad (2.9)$$

Со ограничувања:

$$\mathbf{G}^T \pi \leq \mathbf{b}, \quad (2.10)$$

$$u \in \mathcal{U}, \quad (2.11)$$

$$\pi \geq 0. \quad (2.12)$$

Доколку претпоставиме дека за дадено  $\mathbf{y}^k$  се добива оптимално решение на потпроблемот дефиниран со (2.9) и соодветни оптимални вредности на променливите  $u^k$  и  $\pi^k$ , тогаш можеме да го воведеме следниот израз:

$$\eta \geq (\mathbf{h} - \mathbf{E}\mathbf{y} - \mathbf{M}u^k)^T \pi^k, \quad (2.13)$$

со кој се прави таканаречен засек на финалното решение, односно негово уточнување и приближување до конечната вредност. Изразот (2.13) се вклучува во главниот проблем дефиниран со изразот:

$$\min_{\mathbf{y}, \eta} \mathbf{c}^T \mathbf{y} + \eta. \quad (2.14)$$

Со ограничувања:

$$\mathbf{A}\mathbf{y} \geq \mathbf{d}, \quad (2.15)$$

$$\eta \geq (\mathbf{h} - \mathbf{E}\mathbf{y} - \mathbf{M}u^l)^T \pi^l, \quad \forall l \leq k, \quad (2.16)$$

$$\mathbf{y} \in \mathbf{S}_y, \quad (2.17)$$

$$\eta \in \mathbb{R}. \quad (2.18)$$

Со решавање на главниот проблем се добиваат соодветните оптимални вредности за променливите  $\mathbf{y}^{k+1}$  и  $\eta^{k+1}$ , каде со  $k$  е означен бројот на тековната итерација. Важно е да се напомене дека при решавање на потпроблемот дефиниран со изразот (2.9) се добива горната гранична вредност (ГГВ), а со решавање на главниот проблем дефиниран со изразот (2.14) се добива долната гранична вредност (ДГВ) од анализираниот проблем. Со решавање на изразот (2.13) и решавање на главниот проблем во секоја итерација, се добиваат нови уточнети вредности за ГГВ и ДГВ. Конвергирањето на овие две гранични вредности ќе доведе до оптимално решение за функцијата на цел дефинирана со изразот (2.4).

Вредностите на  $u^k$  и  $\pi^k$  се екстремните точки од нивните соодветни простори за пребарување. Од аспект на комплексноста на БДЗ алгоритмот, доколку со  $p$  го означиме бројот на екстремни вредности на сетот  $\mathcal{U}$  и со  $q$  го означиме бројот на екстремни вредности на сетот дефиниран со ограничувањата  $\{\mathbf{G}^T \pi \leq \mathbf{b}, \pi \geq 0\}$ , тогаш бројот на итерации за кои БДЗ алгоритмот ќе генерира оптимално решение за (2.4) е во функција од  $pq$  [23].

### 2.3.2 Додавање на променливи и ограничувања

ДПО алгоритмот се користи за решавање на дво-фазна РО, каде несигурните податоци се дефинираат како променливи со гранични вредности дефинирани преку соодветен интервал на несигурност. Исто како и кај БДЗ, ДПО алгоритмот е итеративен во кој до финалното решение се доаѓа преку повеќекратно решавање на главен проблем и потпроблем. Со секое итеративно решавање, ГГВ добиена со решавање на потпроблемот и ДГВ добиена со решавање на главниот проблем, меѓусебно се доближуваат се додека не конвергираат во една вредност која ја означува вредноста од функцијата на цел.

Доколку параметрите од интервалот на несигурност ги дефинираме како променливи ограничени од интервал од дискретни вредности каде  $\mathcal{U} = \{u^1, \dots, u^r\}$ , тогаш на нив ќе соодветствуваат соодветните променливи од втората фаза на РО  $\{\mathbf{x}^1, \dots, \mathbf{x}^r\}$  и истите се добиваат со решавање на потпроблемот. За разлика од БДЗ, кај ДПО алгоритмот нема потреба од воведување на дуалните променливи ( $\pi$ ) од втората фаза во главниот проблем. Во тој случај, дво-фазната РО дефинирана со изразот (2.4) од потпоглавје 2.3.1, може да биде опишана како:

$$\min_{\mathbf{y}} \mathbf{c}^T \mathbf{y} + \eta. \quad (2.19)$$

Со ограничувања:

$$\mathbf{A}\mathbf{y} \geq \mathbf{d}, \quad (2.20)$$

$$\eta \geq \mathbf{b}^T \mathbf{x}^l, \quad \forall l \leq k, \quad (2.21)$$

$$\mathbf{E}\mathbf{y} + \mathbf{G}\mathbf{x}^l \geq \mathbf{h} - \mathbf{M}u^l, \quad \forall l \leq k, \quad (2.22)$$

$$\mathbf{y} \in \mathbf{S}_{\mathbf{y}}, \quad (2.23)$$

$$\mathbf{x}^l \in \mathbf{S}_{\mathbf{x}}, \quad \forall l \leq k, \quad (2.24)$$

$$\eta \in \mathbb{R}. \quad (2.25)$$

каде  $k$  претставува бројачот со кој се означува тековната итерација. Согласно изразите (2.19)-(2.25), решавањето на дво-фазната РО со примена на ДПО алгоритмот се сведува на решавање на проблем од областа на мешано целобројно програмирање. Големината на проблемот, односно бројот на ограничувања зависи од бројот на системските и несигурните променливи, односно од вредноста  $r$ . Кога интервалот со несигурни вредности  $\mathcal{U}$  е многу голем, вклучувањето на сите можни несигурни вредности води кон проблем кој е нерешлив.

Бидејќи целта е да се најде минимум од функцијата опишана со изразот (2.19), а согласно ограничувањето  $\eta \geq \mathbf{b}^T \mathbf{x}^l$ , јасно е дека во секоја итерација ќе се вклучи најголемата вредност на несигурните променливи  $u^l$  преку соодветни променливи  $\mathbf{x}^l$ . Оваа констатација отвара можност за релаксација на математичкиот апарат (а со тоа и решавање на самиот проблем) преку уважување на карактеристични репрезентативни вредности од интервалот на несигурност  $\mathcal{U}$ . Овие карактеристични вредности се добиваат преку решавање на потпроблемот. Решавањето на функцијата на цел

дефинирана со изразот (2.19) всушност го дефинира главниот проблем од РО. Со решавањето на главниот проблем се добива ДГВ која што се уточнува со секоја итерација, бидејќи во секоја итерација се додава нова карактеристична вредност за несигурната променлива  $u^l$ . Поради тоа, во секоја итерација, бројот на променливи и ограничувања се зголемува. Оттаму потекнува и името на оваа метода.

Потпроблемот може да се опише со следната релација:

$$\max_{u \in \mathcal{U}} \min \mathbf{b}^T \mathbf{x}. \quad (2.26)$$

Со ограничувања:

$$\mathbf{G}\mathbf{x} \geq \mathbf{h} - \mathbf{E}\mathbf{y} - \mathbf{M}u, \quad (2.27)$$

$$\mathbf{x} \in S_{\mathbf{x}}. \quad (2.28)$$

За да се избегне „max min“ изразот од функцијата на цел од потпроблемот се препорачува примена на условите на ККТ за јака или слаба дуалност. Со проверка на овие услови се потврдува постоењето на дуална функција со која „min“ функцијата од изразот (2.26) може да се преформулира во „max“ и да се соедини со „max“ функцијата која се однесува на несигурната променлива  $u$ . Со воведувањето на ККТ условите, потпроблемот го дефинираме како:

$$\max_{u, \mathbf{x}} \mathbf{b}^T \mathbf{x} \quad (2.29)$$

Со ограничувања:

$$\mathbf{G}\mathbf{x} \geq \mathbf{h} - \mathbf{E}\mathbf{y} - \mathbf{M}u, \quad (2.30)$$

$$\mathbf{G}^T \boldsymbol{\pi} \leq \mathbf{b}, \quad (2.31)$$

$$(\mathbf{G}\mathbf{x} - \mathbf{h} + \mathbf{E}\mathbf{y} + \mathbf{M}u)\boldsymbol{\pi} = 0, \quad (2.32)$$

$$(\mathbf{b} - \mathbf{G}^T \boldsymbol{\pi})\mathbf{x} = 0, \quad (2.33)$$

$$u \in \mathcal{U}, \quad (2.34)$$

$$\mathbf{x} \in S_{\mathbf{x}}. \quad (2.35)$$

$$\boldsymbol{\pi} \geq 0, \quad (2.36)$$

каде со  $\boldsymbol{\pi}$  е дефинирана дуалната променлива на  $\mathbf{x}$ . Со решавањето на потпроблемот се добиваат карактеристичните репрезентативни вредности од несигурните променливи  $u^l$ , а соодветно на нејзе и вредностите за системската променлива  $\mathbf{x}^l$ . Бидејќи целта на потпроблемот е да се најде максимум од функцијата опишана со изразот (2.26), следува дека несигурните променливи  $u^l$  ќе ја добијат најнеповолната (максималната, екстремната) вредност од аспект на целокупниот анализиран оптимизациски проблем опишан со изразот (2.4).

ДПО алгоритмот се извршува согласно следниот редослед:

1. Се дефинира: ДГВ =  $-\infty$ , ГГВ =  $\infty$ ,  $k = 0$ ,  $\epsilon =$  точност;
2. се решава детерминистичкиот модел за проблемот (израз 2.4) и се добиваат почетните вредности за системската променлива од првата фаза  $\mathbf{y}^0$ .
3. се дефинира:  $k = 1$ ;
4. со вредноста за системската променлива  $\mathbf{y}^{k-1}$ , се решава потпроблемот дефиниран со изразот (2.26). Се добива новата вредност за ГГВ<sup>k</sup>, како и вредностите за системската променлива од втората фаза  $\mathbf{x}^k$  и несигурната променлива  $u^k$ ;

5. со добиените вредности за  $\mathbf{x}^k$  и  $u^k$  се зголемува бројот на ограничувања во главниот проблем (изрази: 2.21, 2.22 и 2.24) и се решава главниот проблем дефиниран со изразот (2.19). Се добива нова вредност за  $\text{ДГВ}^k$  и за системската променлива  $\mathbf{y}^k$ ;
6. доколку  $\text{ГГВ}^k - \text{ДГВ}^k \leq \epsilon$ : исполнет услов за крај на итеративното решавање,  $\mathbf{y} = \mathbf{y}^k, \mathbf{x} = \mathbf{x}^k$  и функцијата на цел за целокупниот проблем дефиниран со изразот (2.4) ја добива вредноста на  $\text{ДГВ}^k$ . Доколку  $\text{ГГВ}^k - \text{ДГВ}^k > \epsilon, k = k + 1$ , повторно извршување на точките од 4 до 6.

Од аспект на комплексноста на ДПО алгоритмот, доколку со  $p$  го означиме бројот на екстремни вредности на сетот  $\mathcal{U}$ , тогаш бројот на итерации за кои ДПО алгоритмот ќе генерира оптимално решение за (2.4) е во функција од  $p$  [23].

### 2.3.3 Споредба на БДЗ и ДПО алгоритмите

БДЗ и ДПО алгоритмот имаат неколку сличности, како на пример поделбата на основниот проблем на два проблеми: главен проблем и потпроблем. И кај двата алгоритми до конечното решение се доаѓа користејќи итеративна постапка, преку повеќекратно решавање на главниот проблем и потпроблем и споредба на резултатите добиени од тековната итерација.

Сепак, овие два алгоритми имаат и доста разлики кои особено влијаат на нивната примена и ефикасност. Помеѓу БДЗ и ДПО алгоритмот се издвојуваат следните значајни разлики:

- Од аспект на системските променливи: во ДПО алгоритмот, со секоја итерација бројот на ограничувања и бројот на системски променливи во главниот проблем се зголемува. Во БДЗ алгоритмот бројот на системски променливи е ист во секоја итерација.
- ДПО алгоритмот дозволува генерален пристап кон справување со проблемот од областа на РО, од аспект на конвергирање на конечното решение. Кај БДЗ алгоритмот, потребни се дополнителни модификации во функција од спецификите на проблемот кој се анализира.
- Споредбено со БДЗ алгоритмот, во главниот проблем од ДПО алгоритмот се вклучени поголем број на ограничувања и променливи. Бројот на променливи во ДПО алгоритмот се зголемува со секоја итерација, што навидум го прави покомплексен споредбено со БДЗ алгоритмот. Сепак, согласно податоците презентирани во потпоглавје 2.3.1 и 2.3.2, бројот на итерации за кои ДПО алгоритмот конвергира е во функција од  $p$ , додека бројот на итерации за кои БДЗ алгоритмот конвергира е во функција од  $pq$  (доколку проблемот опишан во втората фаза од РО се заснова на линеарно програмирање). Тоа значи дека бројот на итерации за кои ДПО алгоритмот ќе конвергира е за ред на големина  $q$  помал од бројот на итерации за кои БДЗ алгоритмот ќе даде решение. Бидејќи бројот на карактеристични екстремни точки од интервалот на несигурност е експоненцијален во однос на бројот на променливи и ограничувања во втората фаза од проблемот, таквото намалување на бројот на итерации е значаен. Оваа констатација го прави ДПО алгоритмот поефикасен во однос на БДЗ алгоритмот. Доказ за поголемата ефикасност во добивање на решение на ДПО алгоритмот во споредба на БДЗ алгоритмот, за ист проблем од областа на РО, може да се најде во научните трудови [23] и [30].

- 
- При решавање на проблем од областа на РО со примена на БДЗ алгоритмот, постои едно ограничување кое вели дека функцијата на цел од втората фаза од РО, како и ограничувањата кои го дефинираат просторот за пребарување на втората фаза, мора да се засноваат на математичката оптимизација линеарно програмирање. Кај ДПО алгоритмот не постојат вакви ограничувања во однос на математичкиот модел со кој е опишана втората фаза од РО. Ова претставува огромна предност на ДПО алгоритмот во споредба со БДЗ алгоритмот, особено во инженерските науки каде голем дел од оптимизациските проблеми се засноваат на мешано целобројно програмирање.
  - Претходната потточка се однесува на решавањето на главниот проблем од БДЗ алгоритмот преку вклучување на дуалните променливи од променливите со кои е опишана втората фаза од РО дефинирана со изразот (2.4). Исто така, функцијата на цел од втората фаза добиена со дуално програмирање се користи како оптимален засек со кој во секоја итерација се уточнува решението на главниот проблем (израз (2.9) од поглавје 2.3.1). Согласно познавањата на авторот, во математичката наука не постои директна метода за добивање на дуална функција на цел и исполнување на условите за јака дуалност, од проблем кој во својата основна форма се заснова на математичката оптимизација различна од линеарно програмирање. Токму затоа БДЗ алгоритмот е ограничен на решавања на РО проблеми кои во својата втора фаза се опишани со линеарна функција. БДЗ методата не може да се искористи за решавање на РО проблем кој во својата втора фаза опфаќа проблеми од областа на нелинеарно програмирање или мешано целобројно програмирање.

Очигледни се многубројните предности на ДПО алгоритмот во однос на БДЗ алгоритмот за решавање на проблем од класата на мешано целобројно програмирање, каде несигурноста во влезните податоци не смее да биде занемарена. Токму затоа, во оваа докторска дисертација, ДПО алгоритмот ќе биде искористен за развој на три нови оптимизациски методи за оптимално планирање на радијални СДМ во услови на несигурна потрошувачка.

### 3 СТОХАСТИЧКИ МОДЕЛ ЗА ОДРЕДУВАЊЕ НА ИНТЕРВАЛОТ НА НЕСИГУРНОСТ

Кај традиционалните електроенергетски системи, електричната енергија се произведува во големи производни центри кои се географски оддалечени од потрошувачите. Со помош на преносната и дистрибутивната мрежа електричната енергија се дистрибуира до крајните корисници. Ваквиот начин на организација на електроенергетскиот систем постепено се менува поради зголемено присуство на ОИЕ и ЕВ во ДМ.

Бројот на ФП кои се поставуваат во НДМ постојано се зголемува поради неколку причини: обезбедени субвенции и намалување на системските трошоци за нивно производство и поставување [31]. Согласно податоците презентирани во [32], капацитетот на поставени ФП во Европа ја надминува бројката од 400 GWp. Исто така, Европската унија постави нови критериуми кои треба да се исполнат до 2030 година, според кои потребно е намалување на потрошувачката на електрична енергија за 27%, 27% од вкупно произведената електрична енергија да биде од обновливи извори и намалување на нивото на стакленички гасови за 40% споредено со податоците од 1990 година [33]. Од аспект на зголемување на бројот на ЕВ, Меѓународната агенција за енергетика предвидува дека бројот на продадени ЕВ на светско ниво до 2050 година ќе достигне 100 милиони единици годишно [34]. Со потпишувањето на Договорот од Париз [1], и Владата на Република Северна Македонија презема обврски со цел намалување на нивото на стакленички гасови. Токму затоа е донесена Стратегија за развој на енергетиката во Република Северна Македонија [2] во која се даваат следните препораки со цел зголемување на декарбонизација:

- стимулирање на ФП за производство на електрична енергија преку повластени тарифи и премии со аукции,
- зголемен удел на ЕВ преку финансиски стимулации за купување на ЕВ,
- изградба на потребната инфраструктура за полнење на ЕВ на национално и локално ниво.

Научната литература предупредува дека со зголемување на бројот на ФП и ЕВ приклучени на НДМ, може да се доведе во опасност доверливото работење на истата [35], [36]. Причина за таквата опасност е неможноста со доволна точност да се прогнозира електричната енергија која е потребна за полнење на ЕВ, како и непредвидливоста во производството на електрична енергија од ФП. За да се избегне такво непосакувано сценарио, потребно е да се развијат методи и алатки кои ќе им овозможат на проектантите на ДМ да проектираат мрежи кои ќе ја земат предвид непредвидливоста на податоците, односно несигурноста во прогнозирање на потрошувачката на електрична енергија.

Оптимизациските методи засновани на принципите на РО, кој во оваа докторска дисертација се предложуваат за димензионирање на радијални СДМ, може да помогнат во доверливо планирање на ДМ кај кои има голема несигурност во влезните податоци, односно несигурност во прогнозата на врвното оптоварување. Како основен податок кој е потребен при дефинирање на оптимизациски метод заснован на РО е интервалот на несигурност со кој се опишува несигурната променлива.

Кога се анализираат мрежи кои снабдуваат со електрична енергија потрошувачи од типот домаќинство и лесна индустрија, секој од јазлите во СДМ всушност напојува НДМ. Доколку во НДМ има присуство на ЕВ и ФП, еквивалентната врвна моќност со



која нисконапонската мрежа ја оптоварува среднонапонската е тешко да се предвиди. Покрај влијанието кое доаѓа од полнењето на ЕВ и произведената електрична енергија од ФП, потребно е да се земе предвид и варијацијата во општата потрошувачка на домаќинствата. Затоа, преку развивање на модел за прогнозирање на минимална и максимална врвна моќност, всушност го одредуваме интервалот на несигурност за секој од јазлите од среднонапонската мрежа.

За да се земат предвид сите чинители кои влијаат на интервалот на несигурност, во ова поглавје од докторската дисертација е развиен стохастички модел кој се заснова на итеративна постапка базирана на принципите на МК методот. Изработени се три модели за симулирање на еквивалентната дневна крива на оптоварување на едно домаќинство:

- модел за симулирање на дневна крива за полнење на ЕВ,
- модел за симулирање на дневна производна крива од ФП,
- модел за симулирање на општа потрошувачка на домаќинство.

### 3.1 Модел за симулирање на дневна крива за полнење на ЕВ

#### 3.1.1 Обработка на податоци од анкети за транспортните навики на луѓето

Моделот за симулирање на дневна крива за полнење на ЕВ (МЕВ) има за цел да одреди кога, каде, со која моќност и колку енергија му е потребно на едно ЕВ за целосно да ги задоволи своите потреби од електрична енергија во текот на еден ден. Бидејќи дел од овие податоци се од случајна природа и зависат директно од животниот стил на сопственикот на возилото, се предлага модел заснован на МК методата со цел испитување на што е можно поголем број на сценарија со произволни вредности за карактеристичните влезни податоци. МЕВ е изграден врз база на податоци добиени со обработка на податоци достапни во анкети кои ги забележуваат транспортните навики на луѓето.

За да може да се моделираат дневните потреби за полнење на едно ЕВ кое е приклучено на НДМ, потребно е да се одредат следните податоци:

- дневно возено растојание [km],
- време на пристигнување = време на започнување со полнење,
- тип на возило: седан, комбе, пикап комбе или теренско возило,
- тип на полнач: монофазен или трофазен,
- потрошувачка [kWh/km],
- капацитет на батерија [kWh],
- локација (јазол) од НДМ каде е приклучено ЕВ за полнење.

Со цел опфаќање на поголем број карактеристични сценарија, за секое возило кое ќе биде вклучено, во секоја МК итерација сите параметри од претходната листа ќе бидат случајно одбрани, согласно претходно дефинирани правила.

Во овој модел се користат податоци од анкета за транспортните навики на жителите на Соединетите Американски Држави спроведена од април 2016 до мај 2017 година [37]. Во извештајот од анкетата постојат четири документи со податоци од кои само два се потребни за креирање на МЕВ: „trippub.csv“ и „vehpub.csv“. Во „trippub.csv“ документот има податоци за повеќе од 900,000.- индивидуални дневни патувања на анкетирани граѓани. Оние патувања кои учесниците во анкетата ги извршиле користејќи јавен превоз или пешачеле, не се земени предвид при обработката на податоците.

Потребно е да се применат следните чекори при обработка на податоците во „trippub.csv“:

- патувањата кои се однесуваат на совозачите во возилото потребно е да се изостават,
- бидејќи се анализираат дневните потреби за полнење на ЕВ во сопственост на домаќинство, потребно е да се вклучат само лесни комерцијални возила од типот: седан, комбе, пикап комбе и теренски возила,
- патувањата кои се направени со пешачење, користење на јавен превоз, брод, мотор или воз мора да бидат избришани од базата со податоци.

Откако податоците од „trippub.csv“ се обработени, две информации може да се добијат од ова множество со податоци: дневното извозено растојание и времето на пристигнување на возилото од последното возење во текот на денот, за кое се претпоставува дека е времето кога ЕВ започнува со полнење. Во табелата 3.1 е прикажан пример од податоци за пет патувања во текот на еден ден, од второто возило кое е во сопственост на домаќинство со реден број 30000082. Последното патување за денот завршило во 17:26 часот. Ова време ќе го сметаме за почеток на полнење на ЕВ. Дневното извозено растојание ќе го пресметаме согласно следниот израз:

$$d_{EV} = \sum_{i=1}^{T_n} T_i \quad (3.1)$$

каде со  $d_{EV}$  е означено вкупното растојание кое е извозено,  $T$  ги претставува индивидуалните патувања, а  $T_n$  е вкупниот број на патувања во текот на еден ден.

**Табела 3.1** Податоци за дневно патување на едно возило од базата со податоци

Домаќинство	Патување	Пристигнување	km	Возило
30000082	1	7:52	2.710	2
30000082	2	8:13	1.432	2
30000082	3	8:28	0.777	2
30000082	4	16:57	1.075	2
30000082	5	17:26	2.727	2

Податоците за редниот број на домаќинството и редниот број на возилото во домаќинството треба да се споредат со истите податоци од документот „vehpub.csv“, со цел добивање информација за типот на возилото. Дополнителна информација која може да се добие од документот „vehpub.csv“ се извозените километри на годишно ниво за секое возило. На пример, возилото со реден број 1 од табела 3.2 не било користено на денот кога неговите сопственици ја пополнувале анкетата. Поради тоа, за ова возило не можат да се најдат податоци во документот „trippub.csv“. За ова возило, дневното извозено растојание ќе го добиеме кога просечната вредност од годишното, односно извозените километри на годишно ниво, ќе ги поделиме со 365 [38].

**Табела 3.2** Податоци за типот на возило

Домаќинство	Возило	Тип на возило	Годишни km
30000082	1	1	15000
30000082	2	1	8000

Како резултат од претходно опишаната процедура, добиени се податоци за повеќе од 200,000.- дневно извозени растојанија и повеќе од 150,000.- времиња на

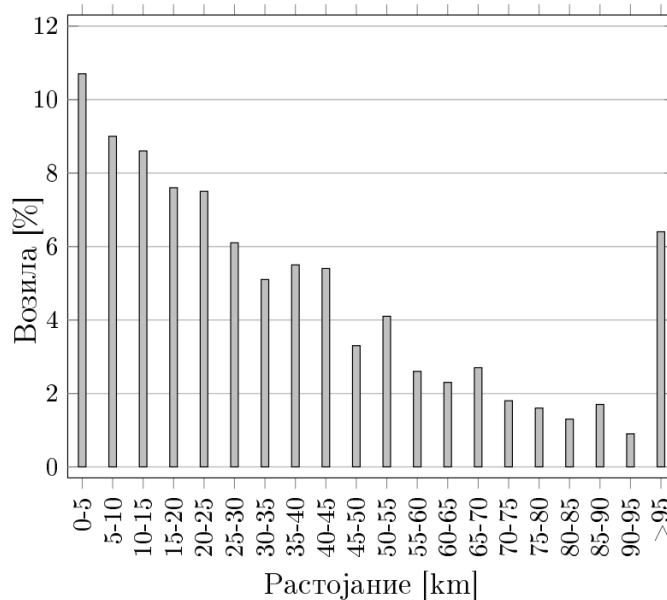
пристигнување кои ќе бидат искористени во моделот. Битно е да се напомене дека во основните документи, извозените растојанија се внесени во милји и се препорачува истите да се претворат во километри. Дистрибуцијата на возилата според нивниот тип е прикажана во табела 3.3 и истата ќе се искористи при симулација на дневните потреби за полнење на ЕВ кои се приклучени на НДМ. Овој податок се добива од документот „vehpub.csv“.

Табела 3.3 Распределба на возилата според типот на возило

Седан [%]	Теренско [%]	Комбе [%]	Пикап комбе [%]
50.72	25.47	5.37	18.44

На сликата 3.1 е прикажана процентуална распределба на дневно поминатите растојанија со резолуција од 5 километри. Овој податок оди во прилог на користење на ЕВ, особено во урбани подрачја, бидејќи повеќе од 69% од возилата поминуваат помалку од 50 километри во текот на еден ден. Ова растојание лесно може да се извози со едно полнење на возилото, дури и при користење на хибридно ЕВ со приклучок за кое е општо познато дека има помал домет со едно полнење.

Од друга страна пак, сликата 3.2 дава информација за времето на пристигнување од последното возење во текот на денот. Од сликата може да се забележи дека поголемиот број на возила пристигнуваат во периодот од 15:00 до 21:00 часот. Под претпоставка дека во моментот на пристигнување од последното патување, сопственикот на возилото веднаш ќе го приклучи возилото да се полни, ќе дојде до зголемување на врвната моќност на домаќинството кое поседува ЕВ, а со тоа и до зголемување на врвното оптоварување во целокупната НДМ [39]. Овој податок не оди во прилог на користењето на ЕВ од аспект на врвно оптоварување на НДМ.



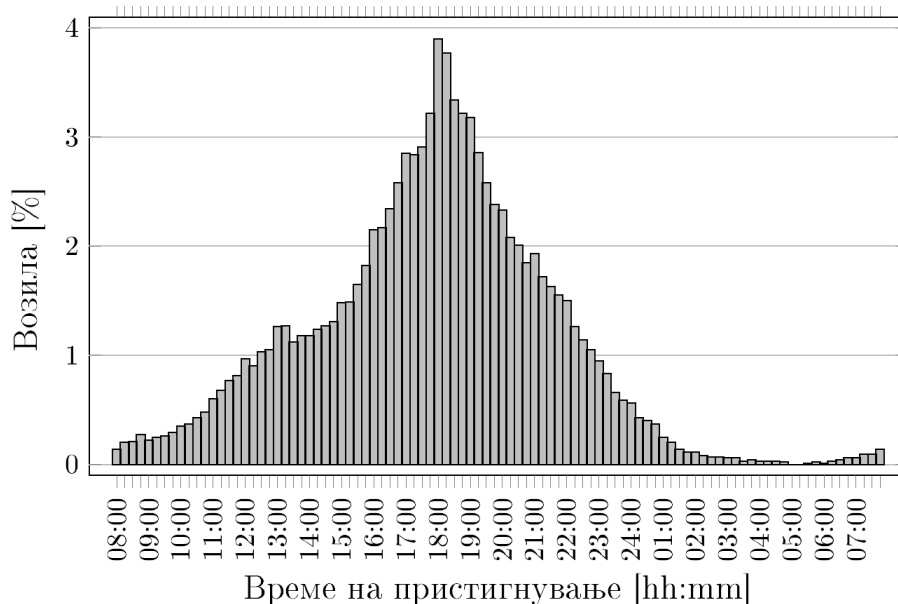
Слика 3.1 Процент на возила во функција од извозени километри

### 3.1.2 Крива на оптоварување од едно ЕВ

Целта на овој модел е да се добие дневна крива на оптоварување од едно ЕВ кое е приклучено за полнење во НДМ. За таа цел, потребно е да се обезбедат податоци за сите седум потточки од потпоглавје 3.1.1. Во стохастичкиот модел, за секоја симулација

на ЕВ од тековната итерација, сите седум податоци ќе бидат случајно одбрани од множество на претходно обработените податоци.

Првиот податок, дневно извозено растојание  $d$  се одбира случајно од обработените податоци од документот „triprub.csv“. Согласно податоците презентирани на слика 3.1, веројатноста дека случајно одбрано дневно извозено растојание на едно возило ќе биде помало од 50 km е 69%.



Слика 3.2 Процент на возила во функција од време на пристигнување

Вториот податок, време на започнување со полнење, е исто така вредност која е случајно одбрана од обработените податоци од анкетата. Согласно податоците презентирани на слика 3.2, веројатноста дека возилото ќе се приклучи за полнење во период од 15:00 до 21:00 часот е 63%.

Со цел симулирање на моќноста на полначот на ЕВ ќе се послужи со податоци достапни во литературата. Во [39] и [40] е забележано дека ефикасноста на полначите кои се користат во домашни услови е 88%, додека струјата која се користи за полнење не ја надминува вредноста од 10 А. Користејќи ги овие податоци, моќноста при користење на монофазен или трофазен полнач може да се пресмета користејќи ги следниве релации:

$$P_{ch}^{1p} = \frac{V_{1p} \cdot I_{ch}}{\psi_{ch}} \quad (3.2)$$

$$P_{ch}^{3p} = \frac{3 \cdot V_{1p} \cdot I_{ch}}{\psi_{ch}} \quad (3.3)$$

каде  $V_{1p}$  е номиналниот фазен напон во НДМ, а  $\psi_{ch}$  е ефикасноста на полначот на ЕВ.

Потрошувачката на електрична енергија за различни типови на ЕВ е прикажана во табела 3.4. Доколку се претпостави дека тежината на самата батерија не влијае значително на потрошувачката на возилото, капацитетот на батеријата може да се пресмета кога потрошувачката на електрична енергија ќе се помножи со максималното растојание кое возилото може да го извези со едно полнење. Во табелата 3.5 се прикажани капацитетите на батериите за возила чии декларирани домет со едно полнење

е 48, 64 и 96 километри. Капацитетот на батеријата за секое возило кое се симулира е случајно одбран податок од табела 3.5, во функција од типот на возилото.

Изразот (3.4) ја пресметува енергијата која е потребна за целосно полнење на ЕВ во моментот на пристигнување од последното возење. Енергијата е во функција од потрошувачката, дневното извозено растојание  $d_{ch}$  и дометот на ЕВ со едно полнење.

$$E_{ch} = \begin{cases} B_{cap}, & d_{ch} \geq \text{домет} \\ \text{потрошувачка} \cdot d_{ch}, & d_{ch} < \text{домет} \end{cases} \quad (3.4)$$

Времето потребно на ЕВ целосно да се наполни се пресметува согласно изразот:

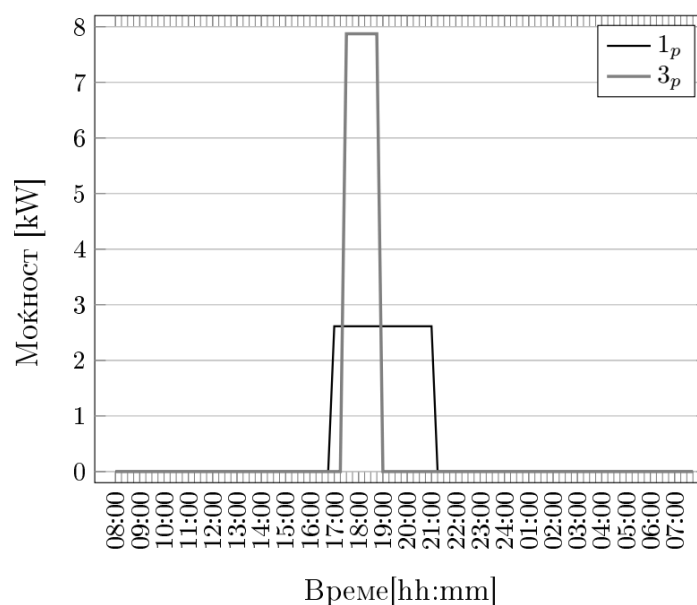
$$T_{ch} = \frac{E_{ch}}{P_{ch} \cdot \psi_{ch}} \quad (3.5)$$

Табела 3.4 Потрошувачка на електрична енергија на ЕВ [39]

Тип на возило	Потрошувачка [kWh/km]
Седан	0.1616
Комбе	0.3164
Теренско	0.2858
Пикап комбе	0.2907

Табела 3.5 Капацитет на батерија

Тип на возило	Капацитет за 48 km [kWh]	Капацитет за 64 km [kWh]	Капацитет за 96 km [kWh]
Седан	7.8	10.4	15.6
Комбе	15.3	20.4	30.5
Теренско	13.8	18.4	27.6
Пикап комбе	14.0	18.7	28.1



Слика 3.3 Крива на оптоварување за две ЕВ

Пример за симулирана крива на оптоварување за две ЕВ, користејќи го стохастичкиот модел е прикажан на слика 3.3. Првата крива се однесува на ЕВ кое се полни со монофазен полнач, а втората се однесува на возило кое се полни со трофазен полнач. Двете возила се од ист тип, во текот на денот извозиле исти растојанија, имаат ист капацитет на батеријата, но со различно време на приклучување. Од сликата може да се донесе заклучок дека монофазниот полнач е подобар од аспект на неповолното влијание врз НДМ. Со користење на монофазни полначи, врвната моќност која е потребна за полнење на група на ЕВ во една иста НДМ би бил помал споредбено со врвната моќност кога се користат трофазни полначи.

### 3.1.3 Крива на оптоварување од група електрични возила

Со цел одредување на влијанието кое полнењето на група ЕВ го има врз дадена НДМ, потребно е најпрво да се одреди бројот на ЕВ кои би се приклучиле на мрежата. Тој број е во функција од два параметри: бројот на домаќинства кои се напојуваат од НДМ и нивото на пенетрација на ЕВ. Нивото на пенетрација на ЕВ е податок кој тешко може да се предвиди. Но, со изработката на стохастичкиот модел постои можност за анализирање на влијанието врз НДМ за различни вредности на нивото на пенетрација. На тој начин, може да се одреди и граничната вредност за нивото на пенетрација на ЕВ за која НДМ би функционираше без прекршувања на ограничувањата кои се дефинирани во стандардот за квалитет на испорачана електрична енергија EN50160 [41].

Согласно податоците презентирани во документот „vehpub.csv“, средниот број на возила по домаќинство може да се пресмета согласно следната релација:

$$N_{av} = \frac{N_{veh}}{N_{hh}} = 1.976 \quad (3.6)$$

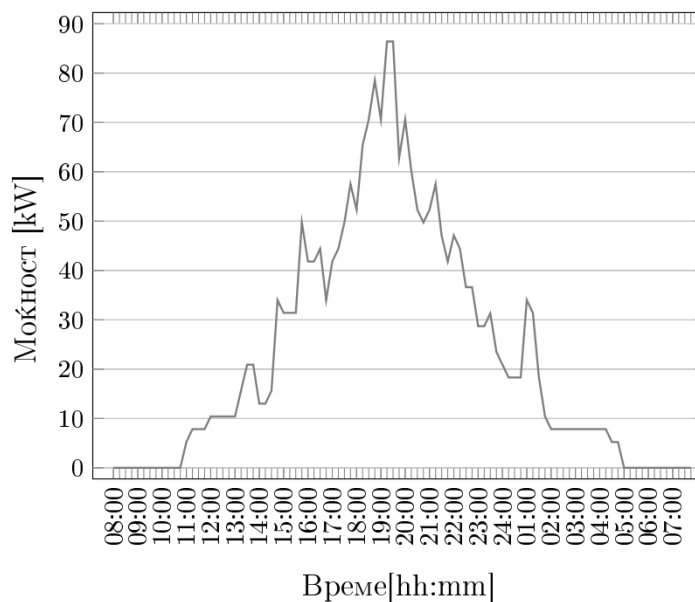
каде со  $N_{veh}$  се означени вкупниот број на возила, а со  $N_{hh}$  вкупниот број на домаќинства заведени во анкетата [37]. Бројот на домаќинства  $N_{HH}$  кои се приклучени на дадена НДМ е податок кој може да се добие од операторот на дистрибутивниот систем. Согласно претходните податоци, вкупниот број на ЕВ се пресметува со следната релација:

$$N_{EV} = int\{N_{HH} \cdot N_{av} \cdot N_p\} \quad (3.7)$$

каде  $N_p$  е нивото на пенетрација на ЕВ и може да биде било кој реален број од 0 до 1.

Во секоја МК итерација, бројот на криви со кои се моделираат потребите за полнење на ЕВ е еднаков на вкупниот број на ЕВ пресметан со изразот (3.7). Јазлите од НДМ на кои ќе бидат додадени кривите на оптоварување за ЕВ ќе бидат случајно одбрани. Единствен услов е да бидат додадени во јазли во кои веќе има приклучено домаќинство. Процедурата за симулирање на кривата на оптоварување од едно ЕВ е презентирана во потпоглавје 3.1.2. Типот на возилото е случајно одбран, имајќи ја предвид распределбата прикажана во табела 3.3.

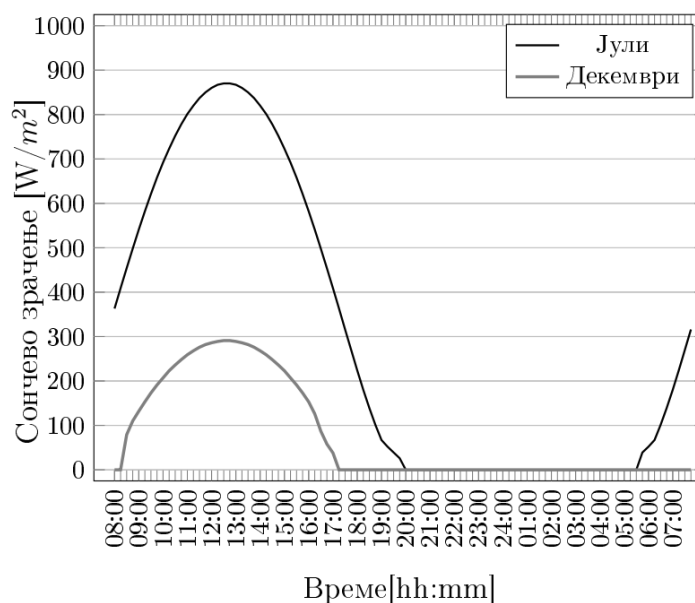
На сликата 3.4 е прикажана кумулативната крива за полнење на 64 ЕВ кои се приклучени во една НДМ. Оваа крива се однесува на една МК итерација. Во секоја МК итерација, кумулативната крива за полнење на група ЕВ ќе биде слична на претходната, со различна врвна моќност во функција од поединечните криви. Од сликата 3.4 евидентно е дека врвната моќност од полнењето на ЕВ се поклопува со очекуваниот период кога настанува врвната моќност од општата потрошувачка на домаќинствата, што може да доведе до пречекорување на ограничувањата дефинирани со стандардот EN50160 со кои се дефинираат правилата за квалитетот на испорачаната енергија во ДМ.



Слика 3.4 Кумулативна крива на оптоварување од 64 ЕВ

### 3.2 Модел за симулирање на дневна производна крива од фотонапонски панели

Сончевото зрачење во одредена географска област е основниот податок потребен при симулирање на производството на електрична енергија од ФП. За таа цел, употребени се податоците од [42]. На сликата 3.5 се прикажани просечните сончеви зрачења за месец јули (месец со максимално врвно сончево зрачење) и декември (месец со минимално врвно сончево зрачење) во период од едно деноноќие без облаци на територија на град Скопје. Податоците се однесуваат на рамна плоча со површина од еден метар квадратен, поставена под агол од  $22^\circ$  во однос на хоризонталната рамнина и азимут од  $0^\circ$ .



Слика 3.5 Сончево зрачење

За да се пресмета произведената електрична моќност во kW, ќе се послужи́ме со изразот:

$$P_{PV} = \frac{G_{sun}}{1000} \cdot A_{PV} \cdot \psi_{PV} \cdot \psi_{sys} \text{ [kW]} \quad (3.8)$$

каде  $G_{sun}$  е сончевото зрачење изразено во  $[W/m^2]$ ,  $A_{PV}$  е вкупната нето површина на поставените ФП,  $\psi_{PV}$  е ефикасноста на ФП при преобразба од сончево зрачење во електрична енергија и  $e_{sys}$  е ефикасноста на системот при преобразба од еднонасочен во наизменичен напон.

Со цел зголемување на доверливоста на резултатите од симулацијата, потребно е да се земе предвид и непредвидливоста во произведената електрична енергија од ФП. За таа цел, кривата на сончево зрачење ќе биде случајно одбрана. Како гранични вредности ќе бидат одбрани кривите прикажани на слика 3.5. Според тоа, дневната крива на сончево зрачење на кое ќе бидат изложени ФП поставени на крововите од домаќинствата, ќе се движи помеѓу карактеристичните криви за сончев ден во јули и декември. На тој начин се симулира сончево зрачење за денови од различни месеци. Дневните промени во интензитетот на сончевото зрачење поради појавување на облаци не се земени предвид. Поради дополнително поедноставување на симулацијата, занемарена е зависноста на ефикасноста на ФП и ефикасноста на системот за преобразба од температурата. Исто така, поради неможност да се предвиди кровната површина на која може да се инсталира ФП, истата ќе биде случајно одбрана. Се претпоставува дека максималната површина на која може да се инсталираат ФП изнесува  $A_{PV}^{max} = 50 \text{ m}^2$ , а минималната  $A_{PV}^{min} = 10 \text{ m}^2$ . За ефикасноста на ФП, како и за ефикасноста на системот за преобразба, употребени се податоци од [43].

### 3.3 Модел за симулирање на општа потрошувачка на домаќинство

Моделот за општа потрошувачка на домаќинство се базира на податоци достапни за нисконапонска тест мрежа од ИЕЕЕ [44]. Истиот може да се примени и за реални мрежи за кои е позната општата потрошувачка на домаќинствата и топологијата на мрежата. Тест мрежата со радијална топологија е прикажана на слика 3.6. Номиналниот напон е 0.4 kV, фреквенцијата е 50 Hz и има вкупно 55 домаќинства кои се приклучени на мрежата. НДМ е приклучена на СДМ преку трансформатор со номинална моќност од 800 kVA. Вкупната должина на сите водови во НДМ изнесува 1,431 метри. Дополнителни податоци за водовите и за параметрите на трансформаторот се дадени во [44].

Уважувањето на несигурноста во општата потрошувачка на домаќинствата придонесува за дополнителна веродостојност на резултатите добиени од моделирањето. Како основен податок потребен во овој модел е кривата на оптоварување која ја претставува општата потрошувачка на домаќинствата, кај која, по пат на одредени математички изрази се воведува одредена несигурност во нејзиниот конечен облик. Во [44] има достапни податоци за дневните криви на оптоварување за 55-те домаќинства кои се напојуваат од НДМ прикажана на сликата 3.6. Кривите на оптоварување се со резолуција од една минута. Бидејќи МЕВ моделот презентира во потпоглавје 3.1 е развиен во 15 минутни интервали, потребно е кривите на оптоварување на домаќинствата да се моделираат со иста резолуција. За таа цел, како петнаесет минутна вредност е одбрана максималната вредност на моќноста во текот на соодветниот временски интервал. Реактивната моќност на домаќинствата е пресметана со уважување на фактор на моќност  $\cos\phi = 0.95$ .

Со цел зголемување на доверливоста на резултатите од моделирањето, во секоја итерација се врши непредвидлива модификација на кривата на оптоварување за секое од

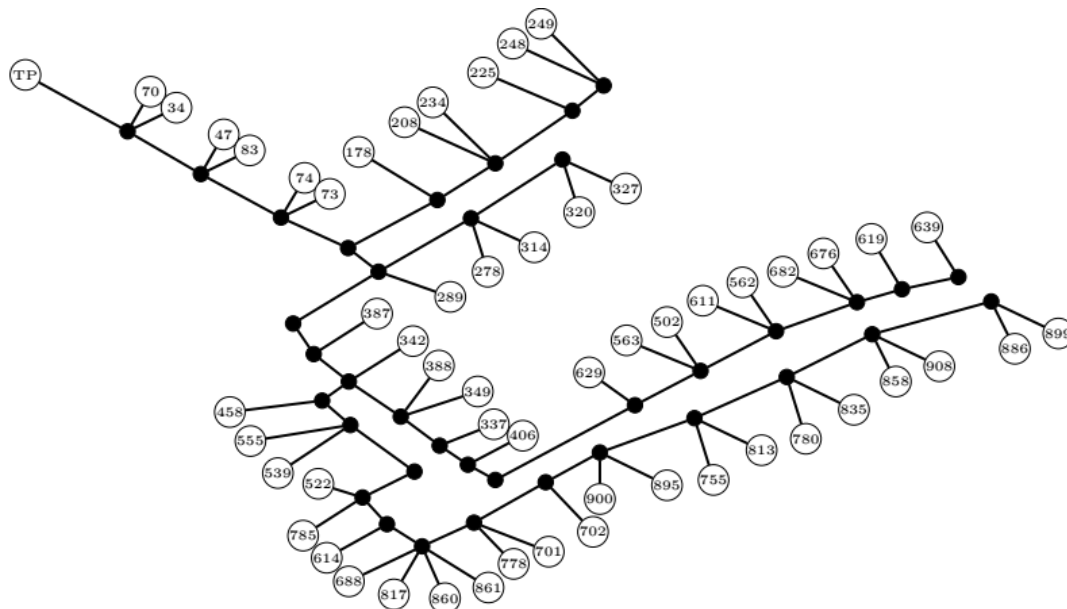


55-те домаќинства. Резултатите од модификацијата на кривата на оптоварување, за две домаќинства, е прикажана на слика 3.7 и е извршена согласно следните изрази:

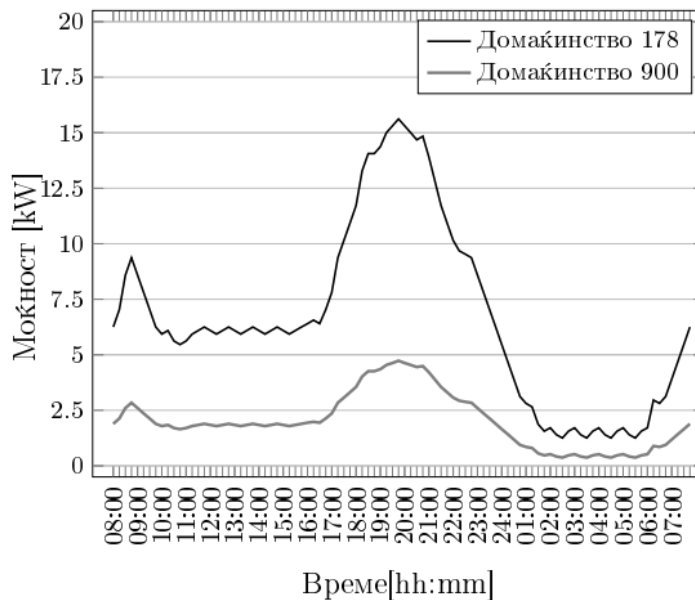
$$P_{i,j} = \text{random}(\mu_i, \sigma_i), \quad i = 1, 2, \dots, N_{HH}, j = 1, 2, \dots, 96, \quad (3.9)$$

$$\mu_{i,j} = P_{i,j}^{15\text{min}}, \quad (3.10)$$

$$\sigma_{i,j} = 0.1 \cdot \mu_{i,j}. \quad (3.11)$$



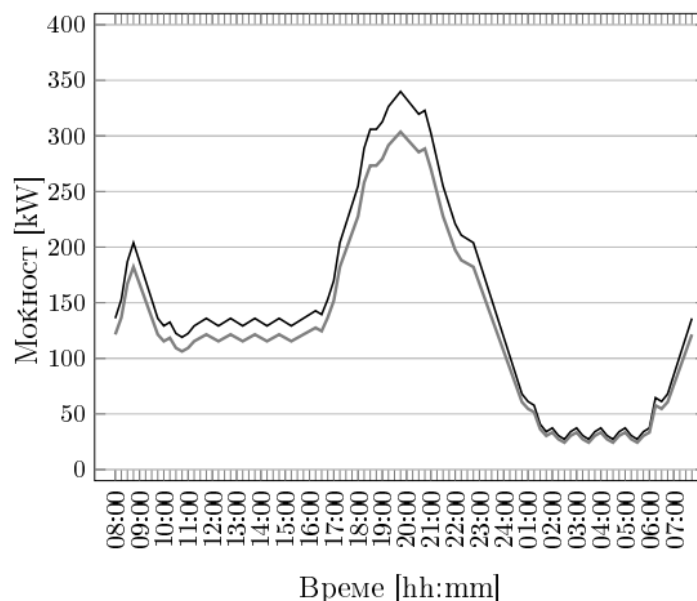
Слика 3.6 IEEE тест мрежа [44]



Слика 3.7 Криви на оптоварување од две домаќинства

Според изразот (3.9), моќноста на секое од домаќинствата  $i$ , во секој од 96-те 15 минутни интервали  $j$  се добива како случајна вредност која подлежи на законот на нормална Гаусова распределба со средна вредност  $\mu$  и стандардно отстапување  $\sigma$ . Во секој временски интервал, за секое од домаќинствата, како средна вредност  $\mu_{i,j}$  се одбира вредноста на 15 минутна моќност на соодветното домаќинство во соодветниот временски интервал, согласно податоците за кривите на оптоварување достапни во [44].

Стандардното отстапување за секое домаќинство, во секој временски интервал, се одредува како 10% вредност од средната вредност  $\mu_{i,j}$ . Резултантните кумулативни криви на оптоварување за целокупната НДМ, од двете МК итерации за кои е постигнато најмалото и најголемото врвно оптоварување во мрежата, се прикажани на сликата 3.8.



Слика 3.8 Кумулативни криви на оптоварување од НДМ

### 3.4 Стохастички модел за одредување на интервалот на несигурност

Дијаграмот за имплементација на стохастичкиот модел за одредување на интервалот на несигурност е прикажан на слика 3.9. Со примената на стохастичкиот модел се прави обид да се испробаат доволен број на комбинации од зададениот проблем, со цел одредување на вкупното максимално и минимално врвно оптоварување кое би можело да се појави во анализираната НДМ. Влезните податоци во анализите се одбираат случајно, но се во функција од претходно дефинирана зависност.

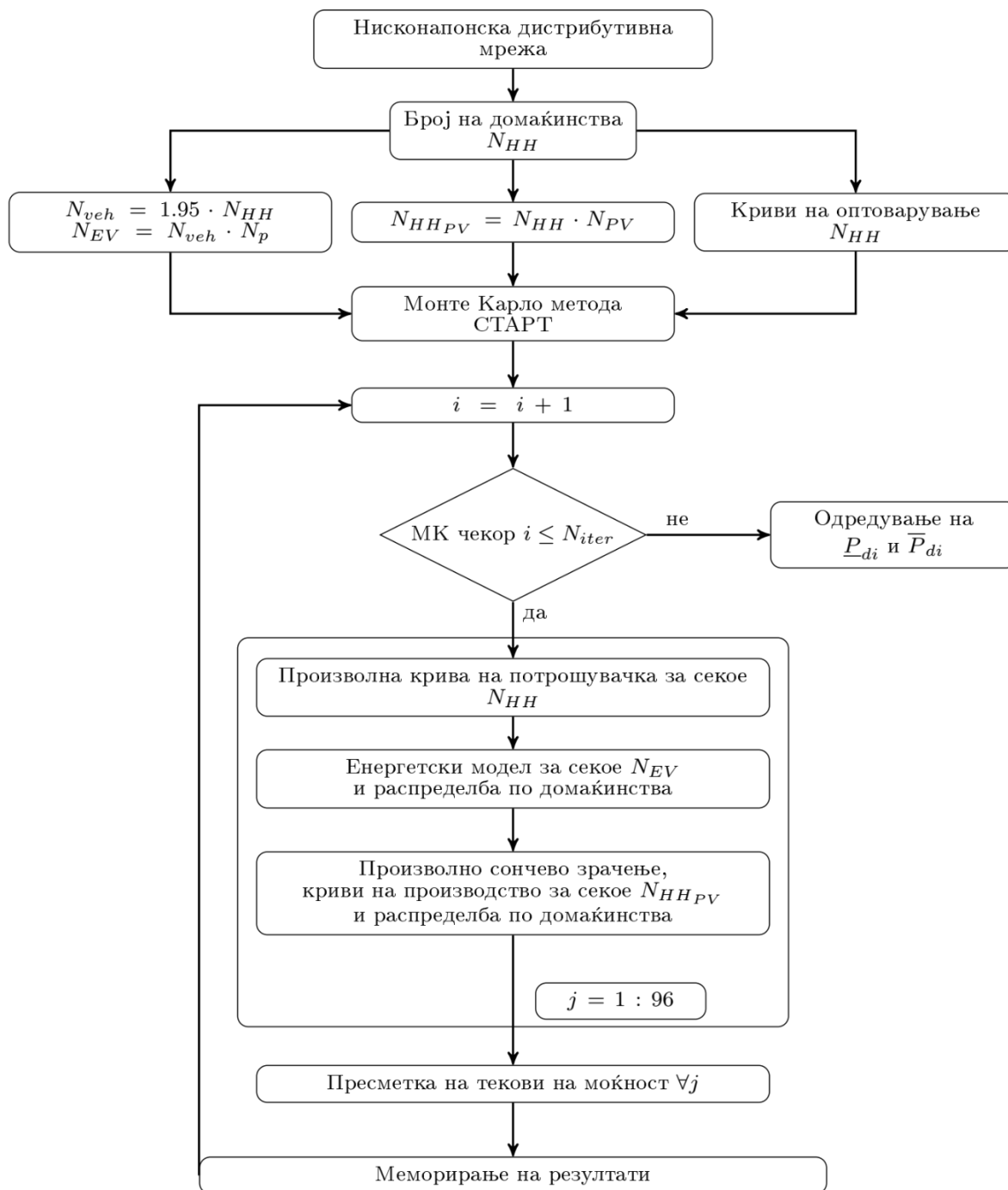
Најпрво, потребни се податоци за топологијата на радијалната НДМ и за бројот на домаќинства кои се приклучени на истата. Бројот на домаќинства кои поседуваат ЕВ се одредува согласно изразот (3.7). При претходно дефинирано ниво на пенетрација на ФП, бројот на домаќинства кои имаат инсталирано ФП се одредува согласно следниот израз:

$$N_{HH_{PV}} = \text{int}\{N_{HH} \cdot N_{PV}\}, \quad (3.12)$$

каде  $N_{PV}$  е број од 0 до 1 со кој се одредува нивото на пенетрација на ФП во НДМ. Кривите на оптоварување за секое од домаќинствата се влезен податок кој е потребен за имплементација на стохастичкиот модел.

Во тековната итерација, за пресметаниот број на ЕВ се генерира кривата на оптоварување, односно се одредуваат дневните потреби за полнење на ЕВ согласно постапката опишана во потпоглавје 3.1. Во наредната итерација кривите на оптоварување за ЕВ ќе бидат различни, бидејќи се одбираат нови случајни вредности за параметрите со кои се опишува МЕВ. Во секоја итерација домаќинствата кои поседуваат ЕВ се одредуваат случајно. Домаќинството кое поседува ЕВ во тековната итерација, може, но и не мора да поседува ЕВ и во наредната.

На сличен начин, во секоја итерација се одредува и случајна крива за сончево зрачење согласно условите дефинирани во потпоглавје 3.2. Домаќинствата кои поседуваат ФП се случајно одбрани, со произволни вредности за кровната површина. Исто како и кај случајната распределба на ЕВ по домаќинства, домаќинството кое поседува ФП во тековната итерација, може, но и не мора да поседува ФП и во наредната. Со цел уважување на непредвидливоста во општата потрошувачка на домаќинствата, во секоја МК итерација кривата на оптоварување за секое домаќинство ќе биде случајно модифицирана согласно моделот презентирани во потпоглавје 3.3.



Слика 3.9 Логички дијаграм – примена на МК методот

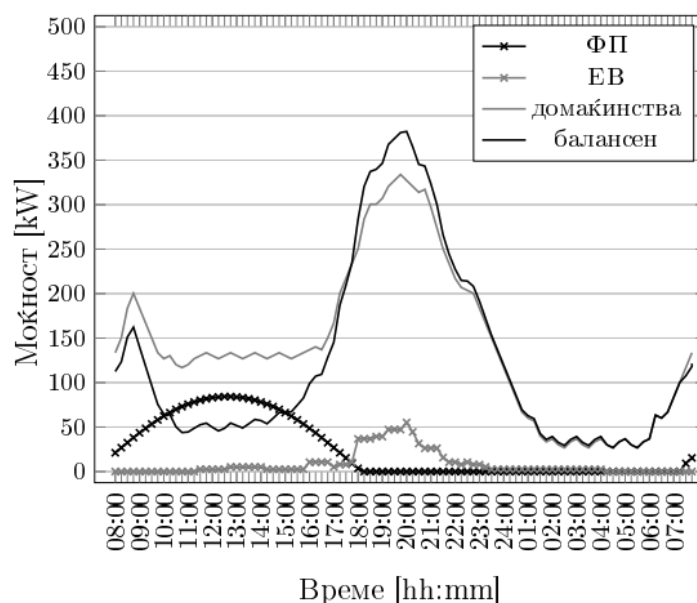
На крајот од секоја итерација, за секој од јазлите во НДМ се добива кумулативна дневна крива на оптоварување за соодветното домаќинство во функција од:

произволната крива на оптоварување од општата потрошувачка на домаќинството, кривата на оптоварување за полнење на ЕВ и производната крива од ФП во сопственост на домаќинството. Вкупниот број на кумулативни криви на оптоварување за секое од домаќинствата е еднаков на бројот на итерации  $N_{iter}$ .

Во секоја МК итерација, за секој од 15-те минутни интервали се врши пресметка на тековите на моќност во НДМ со примена на Њутн-Рафсоновиот метод [45]. Со пресметка на тековите на моќност се земаат предвид и загубите на активна моќност во НДМ. Како резултат од пресметките на текови на моќност се добива и кривата на оптоварување на напојниот јазол во НДМ, односно кривата на оптоварување со која НДМ ја оптоварува СДМ. Од множеството на криви со кои НДМ ја оптоварува СДМ, се одбираат оние две во кои се појавува минималното и максималното врвно оптоварување. Тие две вредности се потребни за дефинирање на интервалот на несигурност со кој е опишана несигурната потрошувачка на активна моќност во јазлите од СДМ. Во табелата 3.6 се прикажани минимално и максимално врвно оптоварување за целокупната НДМ со топологија презентирана на слика 3.6, при ниво на пенетрација на ЕВ  $N_p = 0.5$  и ниво на пенетрација на ФП  $N_{PV} = 0.3$ . Симулациите се направени за различен број на МК итерации.

Табела 3.6 Минимално и максимално врвно оптоварување на НДМ

Моќност	$N_{iter} = 2,000$	$N_{iter} = 4,000$	$N_{iter} = 6,000$	$N_{iter} = 8,000$	$N_{iter} = 10,000$
$\underline{P}_d$ [kW]	246.36	243.71	241.67	240.53	238.72
$\overline{P}_d$ [kW]	368.54	371.35	374.40	377.67	379.65
$P_d^\Delta = \frac{\overline{P}_d - \underline{P}_d}{2}$	61.09	63.82	66.37	68.57	70.47
$P_d^{ref} = \underline{P}_d + P_d^\Delta$	307.45	307.53	308.04	309.10	309.19



Слика 3.10 Максимално врвно оптоварување во НДМ

Во табелата 3.6,  $P_d^{ref}$  ја претставува референтната ангажирана врвна моќност во НДМ, додека со  $P_d^\Delta$  се дефинира максималното отстапување од референтната вредност.

---

Согласно податоците може да се заклучи дека вредноста за  $P_d^{ref}$  постепено конвергира за извршени 10,000 МК итерации. Доколку се направи анализа со поголем број на МК итерации се доаѓа до незначително уточнување на  $P_d^{ref}$ , за сметка на зголемено пресметковно време. Затоа, за потребите на оваа докторска дисертација, сите симулации со кои ќе се моделира интервалот на несигурност ќе се извршат со 10,000 итерации.

На сликата 3.10 е прикажана крива на оптоварување кај која настанува максималната врвна моќност. Оваа вредност е употребена за дефинирање на интервалот на несигурност. Во симулацијата се обработени 10,000 итерации со  $N_p = 0.5$  и  $N_{pv} = 0.3$ . Покрај карактеристичната крива на оптоварување за целокупната НДМ, на сликите се прикажани и: кумулативната крива на оптоварување од општата потрошувачка на сите домаќинства, кумулативната крива на оптоварување од енергијата потребна за полнење на сите ЕВ, како и кумулативната производна крива од сите ФП инсталирани во НДМ.

## 4 ОПТИМАЛНА СЕЛЕКЦИЈА НА ПРЕСЕКОТ НА ВОДОВИ ВО РАДИЈАЛНА ДИСТРИБУТИВНА МРЕЖА

Проблемот за ОСПВ со користење на минимални финансиски средства, претставува дел од општата проблематика на оптималното планирање на ДМ. ОСПВ најчесто наоѓа примена при среднорочни планирања на мрежата, каде дел од пресеците на водовите се познати и потребно е да се одредат само пресеците на нови водови кои се додаваат на постојната мрежа. Презентираната оптимизациска метода во ова поглавје може да се искористи за оптимално димензионирање на радијална мрежа од било кое напонско ниво.

Основни ограничувања кои се јавуваат во проблемот се:

- максимално дозволени загуби на напон,
- биланс на моќности во ДМ,
- разгледуваната мрежа е радијална,
- годишен период за пресметка на трошоците,
- позната топологија на мрежата.

### 4.1 Преглед на научна литература од областа на ОСПВ

ОСПВ во дадена СДМ е проблематика на која работеле голем број научници во последните неколку децении. Меѓу првите трудови кои се занимаваат со оваа проблематика е трудот [46], кој датира дури од 1955 година. Во него е разработена метода за ОСПВ за надградба на СДМ од 4 kV на 13 kV во Индијанаполис, САД. Главен критериум според кој била извршена оптимизацијата биле: минимизирање на трошоците за набавка на материјали и трошоците за изведба. Во [47] е развиен практичен директен метод за решавање на проблемот за ОСПВ кој се заснова на критериумот на константна густина на струја, а во функцијата на цел се вкalkулирани капиталните инвестициски трошоци и трошоците за загуба на електрична енергија. Истите трошоци во функцијата на цел се употребени и во трудот [48] во кој главен недостаток е употребата на вод со ист пресек за сите делници од СДМ. Оптимизациската метода е развиена врз база на нова метода за пресметка на тековите на моќност која е креирана од самите автори на трудот. Авторите на трудот [49] го примениле мешаното целобројно програмирање за решавање на проблемот за ОСПВ. Во функцијата на цел, покрај капиталните трошоци и трошоците поради загуби на енергија се земени предвид и трошоците за ангажирана врвна моќност. Во научната литература е застапено и користењето на еволутивни хуеристички алгоритми за решавање на ОСПВ. На пример, во трудот [50] е употребен генетскиот алгоритам за минимизирање на трошоците. Оптимизација базирана на алгоритмот на рој на честички со функција на цел која вклучува трошоци за изведба и трошоци за загуба на електрична енергија во мрежата е разработен во [51].

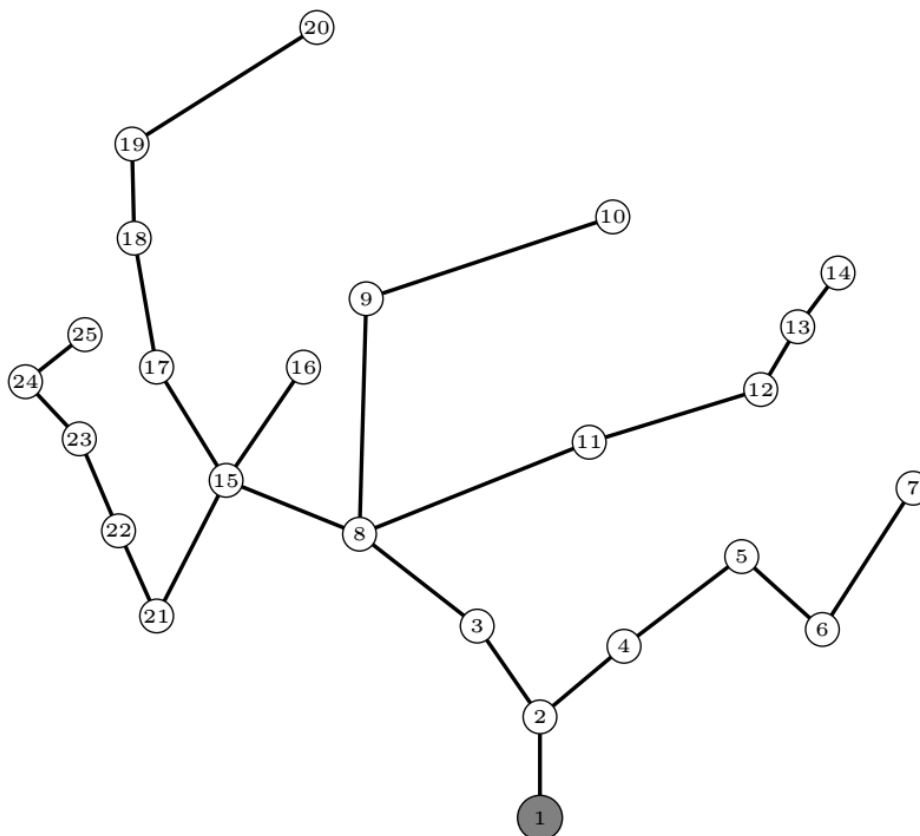
Во сите горенаведени трудови, проблемот за ОСПВ е решен на детерминистички начин, со еднозначни вредности за врвната моќност во јазлите од СДМ. Поради непредвидливоста во полнењето на ЕВ и енергијата произведена од ФП, на проектантите на ДМ им станува сè потешко во процесот на прецизно прогнозирање на врвната моќност од целокупната НДМ. Тој проблем потоа се пресликува во неможност да се предвиди оптоварувањето во јазлите од СДМ.

Многу често ваквата класа на оптимизациски проблеми се решава со мешано целобројно програмирање, преку воведување на бинарна променлива со која се опишува

избраниот вод. Мала промена во несигурните влезни податоци може да доведе до прескок во вредноста на бинарната променлива и да се добие решение кое е компромитирано [52]. Оттаму доаѓа и мотивацијата да се развие метода базирана на РО за решавање на проблемот за ОСПВ. Согласно податоците во поглавје 2, во оптимизациските методи базирани на РО несигурната променлива се дефинира со интервал на несигурност. Тоа им дава одредена слобода на проектантите во прогнозата на врвното оптоварување од потрошувачките јазли во СДМ. За одредување на вредностите на интервалот на несигурност е употребен стохастички модел, опишан во поглавје 3 од оваа докторска дисертација.

## 4.2 Дефинирање на проблемот за ОСПВ

На сликата 4.1 е прикажана топологија на радијална СДМ со номинален напон од  $V_n = 10 \text{ kV}$ . Во мрежата има еден напоен јазол, 24 потрошувачки јазли и 24 гранки. Секој од 24-те потрошувачки јазли напојува НДМ преку соодветен трансформатор среден на низок напон. Ангажираната врвна моќност приклучена на секој од 24-те јазли во СДМ е дефинирана преку соодветен интервал на несигурност кој е во функција од бројот на домаќинства, ЕВ и ФП приклучени во НДМ. Повеќе податоци за параметрите на елементите од СДМ се презентирани во поглавје 6.



Слика 4.1 Топологија на радијална СДМ

Целта на оптимизациската метода е да го одреди пресекот за секој од 24-те водови прикажани на слика 4.1. Во табелата 4.1 се дадени следните податоци за водовите кои се користат при решавањето:

- пресек на вод  $S$  [ $\text{mm}^2$ ],
- подолжна активна отпорност на вод  $r$  [ $\Omega/\text{km}$ ],
- подолжна реактивна отпорност на вод  $x$  [ $\Omega/\text{km}$ ],

- трајно дозволено струјно оптоварување на вод  $I_{max}$  [A],
- трошоци за набавка и поставување на вод  $c_j$  [\$/km].

Многу често дистрибутивниот систем оператор се одлучува ДМ да бидат изградени од што е можно помал број на водови со различен пресек. Има неколку причини за таквата одлука. Меѓу најистакнатите е стандардизирањето на ДМ од исто напонско ниво, преку користење на водови со ист пресек со цел намалување на трошоците за магацинско чување на различни типови на опрема потребна за нивно поврзување. Токму затоа, во анализата на СДМ прикажана на слика 4.1 се разгледаат две сценарија: сценарио во кое е дозволено да се користат сите водови со различен пресек и сценарио во кое е дозволено да се користат само два типа на водови од табелата 4.1. На тој начин може да се направи и квантитативна споредба на вкупните годишни трошоци за експлоатација на СДМ во двете сценарија.

Табела 4.1 Параметри на водовите

Пресек [ $mm^2$ ]	$r$	$x$	$I_{max}$	$c_j$
16	2.003	0.136	85	12,000.-
25	1.282	0.131	130	16,000.-
35	0.866	0.126	155	17,200.-
50	0.641	0.121	180	20,300.-
70	0.443	0.116	225	23,300.-
95	0.320	0.112	270	27,600.-
120	0.253	0.108	305	34,500.-
150	0.206	0.105	340	39,000.-
185	0.130	0.096	380	43,500.-

### 4.3 Оптимизациски метод за ОСПВ во услови на детерминистички моделирана потрошувачка

Со цел одредување на оптималниот пресек на водовите од СДМ прикажана на слика 4.1, најпрво е потребно да се дефинира оптимизациски метод во кој активната моќност во јазлите од мрежата е моделирна еднозначно, со детерминистички вредности. Овој оптимизациски метод за решавање на ОСПВ се заснова на математичката оптимизација мешано целобројно програмирање со користење на бинарна системска променлива. Оптимизацискиот метод за решавање на ОСВП во услови на несигурна потрошувачка се надоградува на претходно дефинираниот оптимизациски метод со еднозначно дефинирани врвни моќности.

Функцијата на цел е дефинирана со следниот израз:

$$\min_{v,P,V} g \sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j} l_i c_j + 8760 c_l \beta \sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{C}} \frac{v_{i,j} R_j (1 + tg^2 \varphi)}{V_n^2} P_i^2. \quad (4.1)$$

Со ограничувања:

$$v_{i,j} \in \{0,1\}, \quad i \in \mathcal{L}, j \in \mathcal{C}, \quad (4.2)$$



$$\sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j} = 1, \quad j \in \mathcal{L}, \quad (4.3)$$

$$V_1 = V_s, \quad (4.4)$$

$$V_i \geq \underline{V}_i, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (4.5)$$

$$P_i \leq \bar{P}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (4.6)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j = -P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (4.7)$$

$$\Delta V_i = \sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j} \frac{P_j R_j + P_j X_i \operatorname{tg} \varphi}{V_n}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (4.8)$$

$$V_i = V_k - \Delta V_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (4.9)$$

каде максимално дозволените текови на активна моќност се  $\bar{P}_i = \sqrt{3} V_n I_{max} \cos \varphi$ , за секој од каблите согласно податоците за  $I_{max}$  од табела 4.1.

Функцијата на цел дефинирана со изразот (4.1) се состои од два дела. Првиот дел ги претставува капиталните трошоци за набавка и изведба на водовите, каде трошоците за секој вод  $c_j$  се множат со должината на гранката  $l_i$  и со бинарната системска променлива  $v_{i,j}$ . Бидејќи трошоците се пресметуваат на годишно ниво, потребно е да се земе предвид и стапката на актуализација  $g$ . Вториот дел од функцијата на цел ги претставува трошоците поради загуба на активна енергија во СДМ. Битно е да се напомене дека тековите на реактивна моќност во мрежата се пресметуваат со иста вредност за факторот на реактивна моќност  $\operatorname{tg} \varphi$ , за секој од потрошувачите. Факторот на загуби  $\beta$  се пресметува во зависност од факторот на оптоварување  $\alpha$  согласно следната релација:

$$\beta = 0.15\alpha + 0.85\alpha^2. \quad (4.10)$$

Со изразот (4.2) се дефинираат параметрите на бинарната системска променлива  $v_{i,j}$ . Променливата е дефинирана во матрична форма, со број на редици еднаков на бројот на гранки во СДМ и број на колони еднаков на бројот на водови кои можат да се изберат од табелата 4.1. Бидејќи станува збор за бинарна променлива, вредноста на елементите од матрицата  $v_{i,j}$  можат да бидат со вредност 0 или 1. Со изразот (4.3) се воведува ограничување според кое се дозволува само еден вод од табелата 4.1 да биде избран за секоја од гранките во мрежата прикажана на сликата 4.1.

Со изразите (4.4) и (4.5) се воведуваат ограничувања кои се однесуваат на напонските прилики во СДМ. Согласно изразот (4.4), се дефинира напонот на напојниот јазол во СДМ, а со изразот (4.5) се ограничуваат напоните на сите јазли да бидат поголеми од минимално дозволената вредност  $\underline{V}_i$ .

Изразот (4.6) додава ограничување согласно кое се условуваат тековите на активна моќност низ каблите да не бидат поголеми од максимално дозволената  $\bar{P}_i$ . Со користење на матрицата на инциденција  $\mathbf{A}$ , постои можност за ефикасно претставување на графот на радијална мрежа. Матрицата  $\mathbf{A}$  има број на редици колку што има јазли и број на колони колку што има гранки во мрежата. Во неа се запишуваат податоци кои ги опишуваат врските помеѓу јазлите и гранките од мрежата согласно следните правила:

$$A_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{ако гранката } j \text{ не е поврзана со јазолот } i \\ 1 & \text{ако гранката } j \text{ тргнува од јазолот } i \\ -1 & \text{ако гранката } j \text{ завршува во јазолот } i \end{cases} \quad (4.11)$$

Користејќи ја матрицата  $\mathbf{A}$ , можеме да го додадеме изразот (4.7) со кој се постигнува сумата на сите моќности во еден јазол да биде еднаква на 0. Изразот (4.8) се користи за пресметка на загубите на напон во гранките со помош на номиналниот напон на мрежата  $V_n$ . Со изразот (4.9) се пресметуваат напоните на јазлите во СДМ.

Со цел поедноставување на изразот за функцијата на цел, како и поради поподобна припрема на изразите за компјутерска обработка, се препорачува воведување на векторски запис на дел од параметрите. Се воведуваат векторите  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{\Lambda}$  чии вредности може да се пресметаат со следните изрази:

$$C_j = gc_j, \quad j \in \mathcal{C}, \quad (4.12)$$

$$L_i = l_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (4.13)$$

$$\Lambda_j = 8760c_l\beta \frac{R_j(1 + tg\varphi^2)}{V_n^2}, \quad j \in \mathcal{C}. \quad (4.14)$$

Согласно воведените вектори, функцијата на цел го добива својот конечен облик:

$$\min_{\mathbf{v}, \mathbf{P}, \mathbf{V}} \sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j} L_i C_j + v_{i,j} \Lambda_j P_i^2. \quad (4.15)$$

За вака дефинираната функција на цел важат истите ограничувања, од (4.2) до (4.9).

#### 4.4 Оптимизациски метод за ОСПВ во услови на несигурна потрошувачка

Во научната литература се издвојуваат два општи алгоритми за решавање на проблеми од областа на РО, ДПО и БДЗ алгоритмот. Како што беше елаборирано во потпоглавје 2.3.3 од оваа докторска дисертација, ДПО алгоритмот има поширока примена и е поефикасен во однос на БДЗ алгоритмот. Затоа, оптимизациски метод со детерминистички моделирана потрошувачка при решавање на ОСПВ ќе биде надграден во оптимизациски метод базиран на принципите на РО, со примена на ДПО алгоритмот. За таа цел, најпрво треба да се дефинираат изразите со кои ќе се опише интервалот на несигурност.

Ангажираните активни моќности во потрошувачките јазли од СДМ се дефинирани како несигурни податоци кои влијаат на конечното решение. Токму затоа, активната моќност на потрошувачите е дефинирана како несигурна променлива чија вредност се движи во границите на интервалот на несигурност.

Интервалот на несигурност е дефиниран со следните изрази:

$$\underline{P}_{d_i} = P_{d_i}^{ref} - P_{d_i}^{\Delta}, \quad (4.16)$$

$$\bar{P}_{d_i} = P_{d_i}^{ref} + P_{d_i}^{\Delta}, \quad (4.17)$$

$$\underline{P}_{d_i} \leq P_{d_i} \leq \bar{P}_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (4.18)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{D}} |P_{d_i} - P_{d_i}^{ref}| \leq \Gamma \cdot \sum_{i \in \mathcal{D}} P_{d_i}^{\Delta}, \quad (4.19)$$

каде  $P_{d_i}^{ref}$  и  $P_{d_i}^\Delta$  се референтната моќност и нејзиното отстапување. Вредностите за  $P_{d_i}^{ref}$  и  $P_{d_i}^\Delta$  се добиваат со примена на стохастичкиот модел опишана во поглавје 3. Согласно изразот (4.18), дозволуваме несигурната променлива  $P_{d_i}$  да варира околу својата референтна вредност во границите на интервалот  $P_{d_i}^{ref} \pm P_{d_i}^\Delta$ , за секој од јазлите  $i \in \mathcal{D}$ . Понатаму, со воведување на дополнителниот параметар наречен буџет на несигурност  $\Gamma$  (анг.: „uncertainty budget“), воведуваме уште една контрола во варијабилноста на несигурната променлива  $P_{d_i}$  дефинирана со изразот (4.19).  $\Gamma$  може да биде било кој реален број во интервалот од 0 до 1. Во случајот кога  $\Gamma = 0$ , всушност ја занемаруваме несигурноста во решавањето бидејќи несигурната променлива ќе биде еднаква на референтната. Во случајот кога  $\Gamma = 1$ , воведуваме максимална несигурност бидејќи несигурната променлива може да варира до екстремните вредности дефинирани со интервалот на несигурност.

Математичката функција апсолутна вредност не е диференцијабилна и генерално тешко се оперира со нејзе во услови на решавање на оптимизациски проблем. Бидејќи во изразот (4.19) се појавува апсолутна вредност од разликата помеѓу несигурната променлива и нејзината референтна вредност, потребно е овој израз да се упрости. Тоа го постигнуваме со воведувањето на континуираната променлива  $t$  и изразите:

$$t_i \geq P_{d_i} - P_{d_i}^{ref}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (4.20)$$

$$t_i \geq P_{d_i}^{ref} - P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}. \quad (4.21)$$

Финалниот облик на проблемот за ОСПВ, во кој се вклучени и ограничувања за несигурната променлива  $P_d$  е дефиниран со следните изрази:

$$\min_{v,P,V} \max_{P_d} \sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j} L_i C_j + v_{i,j} \Lambda_j P_i^2. \quad (4.22)$$

Со ограничувања:

$$v_{i,j} \in \{0,1\}, \quad i \in \mathcal{L}, j \in \mathcal{C}, \quad (4.23)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j} = 1, \quad j \in \mathcal{L}, \quad (4.24)$$

$$V_1 = V_s, \quad (4.25)$$

$$V_i \geq \underline{V}_i, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (4.26)$$

$$P_i \leq \bar{P}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (4.27)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j = -P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (4.28)$$

$$\Delta V_i = \sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j} \frac{P_j R_j + P_j X_i t g \varphi}{V_n}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (4.29)$$

$$V_i = V_k - \Delta V_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (4.30)$$

$$\underline{P}_{d_i} \leq P_{d_i} \leq \bar{P}_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (4.31)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{D}} t_i \leq \Gamma \cdot \sum_{i \in \mathcal{D}} P_{d_i}^\Delta, \quad (4.32)$$

$$t_i \geq P_{d_i} - P_{d_i}^{ref}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (4.33)$$

$$t_i \geq P_{d_i}^{ref} - P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}. \quad (4.34)$$

#### 4.4.1 Дефинирање на потпроблемот за ОСПВ

Како што беше елаборирано во потпоглавје 2.3.2 од оваа докторска дисертација, ДПО алгоритмот се решава итеративно со поделба на дво-фазниот ОСПВ оптимизациски метод на два проблеми: главен проблем и потпроблем. Најчесто со втората фаза се дефинира потпроблемот кој се однесува на наоѓање на најнеповолната (максималната) распределба на несигурната променлива.

При решавање на потпроблемот во секоја итерација, вредноста на системската бинарна променлива  $v_{i,j}^{(k-1)}$  која се добива од претходната итерација, се користи за одредување на најнеповолната распределба на несигурната променлива  $P_{d_i}^{(k)}$ . Решавање на потпроблемот во првата итерација, кога  $k = 1$ , се постигнува со користење на вредностите за системската променлива  $v_{i,j}^{(0)}$  добиени со решавање на ОСПВ со детерминистички моделирана потрошувачка.

Бидејќи во решавање на потпроблемот од тековната итерација вредноста на системската променлива е позната,  $v_{i,j}$  во потпроблемот е дефинирана како параметар со позната вредност, а не променлива. Функцијата на цел со кој се опишува потпроблемот е:

$$\max_{P_d} \sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j} \Lambda_j P_i^2. \quad (4.35)$$

Со ограничувања:

$$V_1 = V_s, \quad (4.36)$$

$$V_i \geq \underline{V}_i, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (4.37)$$

$$P_i \leq \bar{P}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (4.38)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j = -P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (4.39)$$

$$\Delta V_i = \sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j} \frac{P_j R_j + P_j X_i t g \varphi}{V_n}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (4.40)$$

$$V_i = V_k - \Delta V_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (4.41)$$

$$\underline{P}_{d_i} \leq P_{d_i} \leq \bar{P}_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (4.42)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{D}} t_i \leq \Gamma \cdot \sum_{i \in \mathcal{D}} P_{d_i}^\Delta, \quad (4.43)$$

$$t_i \geq P_{d_i} - P_{d_i}^{ref}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (4.44)$$

$$t_i \geq P_{d_i}^{ref} - P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}. \quad (4.45)$$

Потпроблемот припаѓа во класата на мешано целобројно линеарно програмирање. Бидејќи ја користиме вредноста на системската променлива  $v_{i,j}^{(k-1)}$

добиена од претходната итерација, а целта на целокупниот оптимизациски метод е да се намалат трошоците, резултатите кои ги добиваме со решавање на потпроблемот во итерацијата  $k$  можеби не се најдобрите. Сепак, со решавање на потпроблемот ја добиваме вредноста на функцијата на цел дефинирана со изразот (4.35) и можеме да ја пресметаме ГГВ за тековната итерација со примена на следниот израз:

$$\text{ГГВ}_k = \sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j}^{(k-1)} L_i C_j + \text{OBJ}_k, \quad (4.46)$$

каде  $\text{OBJ}_k$  е вредноста на функцијата на цел добиена со решавање на потпроблемот во итерација  $k$ .

#### 4.4.2 Дефинирање на главниот проблем за ОСПВ

За решавање на главниот проблем во итерација  $k$  се користат вредностите за несигурна променлива  $P_{d_i}^{(k)}$  добиени со решавање на потпроблемот во сите претходни итерации. Овие вредности за  $P_{d_i}^{(k)}$ , се различни за секоја итерација  $k$ . Бројот на ограничувања во главниот проблем се зголемува со секоја итерација бидејќи се воведуваат копии на ограничувањата со користење на различните вредности за  $P_{d_i}$ .

Со следниот израз се дефинира функцијата на цел на главниот проблем:

$$\min_{\mathbf{v}, \mathbf{P}, \mathbf{V}} \sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j} L_i C_j + \eta. \quad (4.47)$$

Со ограничувања:

$$v_{i,j} \in \{0,1\}, \quad i \in \mathcal{L}, j \in \mathcal{C}, \quad (4.48)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j} = 1, \quad j \in \mathcal{L}, \quad (4.49)$$

$$\eta \geq \sum_{i \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j}^{(k)} \Lambda_j P_i^{(k)^2}, \quad (4.50)$$

$$V_1 = V_s, \quad (4.51)$$

$$V_i^{(k)} \geq \underline{V}_i, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (4.52)$$

$$P_i^{(k)} \leq \bar{P}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (4.53)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j^{(k)} = -P_{d_i}^{(k)}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (4.54)$$

$$\Delta V_i^{(k)} = \sum_{j \in \mathcal{C}} v_{i,j}^{(k)} \frac{P_j^{(k)} R_j + P_j^{(k)} X_i t g \varphi}{V_n}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (4.55)$$

$$V_i^{(k)} = V_i^{(k-1)} - \Delta V_i^{(k)}, \quad i \in \mathcal{L}. \quad (4.56)$$

каде со  $k = 1, 2, \dots$  се бележи бројачот од тековната итерација.

Иако процесот на додавање на ограничувања и променливи во секоја итерација на прв поглед делува контраинтуитивен бидејќи доаѓа до зголемување на проблемот кој треба да биде решен, во литературата има податоци кои докажуваат дека ДПО алгоритмот е поефикасен од БДЗ [27], [23].

---

Со решавање на главниот проблем во тековната итерација  $k$ , се пресметува долната гранична вредност со примена на следниот израз:

$$\text{ДГВ}_k = \sum_{i \in L} \sum_{j \in C} v_{i,j}^{(k)} L_i C_j + \eta^{(k)}. \quad (4.57)$$

Согласно потпоглавје 2.3.2, услов за завршување на итеративниот процес е:

$$\text{ГГВ}_k - \text{ДГВ}_k \leq \epsilon. \quad (4.58)$$

каде  $\epsilon$  претставува дозволената грешка за анализираниот проблем. Вредноста на функцијата на цел, како и вредноста на системската променлива  $v_{i,j}$  се добиваат од последната итерација во итеративната постапка.

## 5 ОПТИМАЛНА КОНФИГУРАЦИЈА НА РАДИЈАЛНА ДИСТРИБУТИВНА МРЕЖА

Одредувањето на Оптимална конфигурација на радијална дистрибутивна мрежа претставува комплексна проблематика која е составен дел од долгорочното планирање на СДМ. Целта на оптимизацијата е да се најде решение со користење на минимални финансиски средства, а притоа да се исполнат сите дефинирани ограничувања.

Проблемот за ОКРДМ често се обработува во научната литература [53], [54]. Во него се вклучени трошоци кои потекнуваат од следните ограничувања:

- ограничувања од аспект на квалитетот на дистрибуирана електрична енергија,
- ограничувања од аспект на техничките карактеристики на уредите кои се користат,
- ограничувања од аспект на амбиенталните прилики во областа каде треба да биде изградена ДМ [55].

Како што беше образложено во поглавје 1 од оваа докторска дисертација, поради сè поголемата пенетрација на ЕВ и на ФП, НДМ ќе претрпат сериозни промени во годините кои следат. Доколку методата за прогноза на вкупното оптоварување е непрецизна и не ги земе предвид новите технологии кои се интегрираат на ниво на НДМ, може да дојде до несоодветно долгорочно планирање на СДМ. Традиционално, проблемот за ОКРДМ се решава со примена на методите за математичко програмирање презентирани во поглавје 2, или со еволутивни хеуристички методи [56].

### 5.1 Преглед на научна литература од областа на ОКРДМ

Авторите на трудовите [57] и [58] развиле метод базиран на мешано целобројно програмирање за решавање на проблемот за ОКРДМ. Истите автори, во трудот [59], развиле метод за долгорочно планирање на СДМ со користење на стохастички модели за управување со потрошувачката. Со примена на ККТ условите, проблемот е сведен на проблем од областа на мешано целобројно програмирање. Во трудот [60] развиен е модел базиран на мешано целобројно програмирање за решавање на ОКРДМ и оптимална диспозиција на дистрибуирани производители на електрична енергија во повеќе временски етапи, во една иста СДМ. Оптимална конфигурација на радијална ДМ реализирана во повеќе временски етапи е само едно од решенијата добиени со примена на општиот метод за планирање на ДМ презентирани во трудот [61]. Оптимизацискиот метод е базиран на мешано целобројно програмирање каде потрошувачката е моделирана детерминистички без уважување на несигурноста. Во трудот [62] е презентирани метод за ОКРДМ во која има значително присуство на ЕВ и на хибридни ЕВ со приклучок. Оптимизацискиот метод се базира на методот на нелинеарно програмирање кој е искористен за развивање на генетски алгоритам (ГА) за решавање на анализираниот проблем. Со цел уважување на несигурната потрошувачка, авторите пристапиле кон решавање на повеќе репрезентативни сценарија. Авторите на трудот [63] го решиле проблемот за ОКРДМ со примена на алгоритамот на рој на честички, кој пак е изработен врз основа на методот нелинеарно програмирање. Потрошувачката е моделирана со детерминистички вредности со помош на три карактеристични степени на оптоварување: ниско, средно и високо. Во трудот [64] е прикажан метод заснован на динамично програмирање. Оптималната конфигурација на мрежата е постигната со уважување на трошоците за изведба на мрежата, како и нејзино доверливо работење.

Несигурната потрошувачка не е земена предвид при креирање на методот. Методот динамично програмирање за решавање на проблемот за ОКРДМ со неуважување на несигурноста во потрошувачката е исто така разработен и во трудот [65]. Исто така, оптимизацискиот метод во себе содржи и алгоритам за вклучување на географско информациона систем (ГИС систем) со цел уважување на географските прилики во процесот на оптимизација. Во трудот [66], оптималната конфигурација на мрежата е постигната со примена на методот на директно решение. Во функцијата на цел се вклучени капитални инвестициски трошоци, трошоци од загуба на електрична енергија во мрежата, како и трошоци поради неиспорачана електрична енергија во случај на испад на некој од водовите. Повторно, несигурноста во потрошувачката на електрична енергија не е земена предвид и моќноста на потрошувачите во мрежата е детерминистички моделирана. Долгорочно оптимално планирање на ДМ со вклучување на дисперзирано производство е презентирано во трудот [67]. Имплементиранитот метод, во кој се земени предвид повеќе функции на цел, е базиран на ГА алгоритмот. ГА е исто така искористен во трудот [68] при изработка на модел за оптимална конфигурација во услови на проширување на постојна ДМ во која е земено предвид и производство на електрична енергија од ОИЕ. Периодите на инвестиција во мрежата се делат на повеќе временски етапи, а несигурната потрошувачка е моделирана преку решавање на повеќе репрезентативни сценарија. Авторите на трудот [69] развиле алгоритам за табу пребарување за одредување на оптимална конфигурација на ДМ во повеќе временски етапи. Алгоритмот за табу пребарување се заснова на нелинеарно програмирање каде потрошувачката на електрична енергија е дефинирана со еднозначни вредности. Бидејќи анализата во трудот е направена за повеќе временски етапи, вклучувањето е процентуален годишен пораст на потрошувачката на електрична енергија за секој од јазлите во мрежата. Во трудовите [70] и [71] е применет алгоритмот на рој на честички за решавање на проблемот за ОКРДМ. И во двата труда потрошувачката на електрична енергија е моделирана детерминистички.

Во некои од референцираните трудови од претходниот пасус, потрошувачката на електрична енергија е моделирана детерминистички. Во дел од трудовите, несигурноста во потрошувачката на електрична енергија и непредвидливото производство на електрична енергија од ОИЕ се моделирани со криви на распределба или со решавање на повеќе репрезентативни сценарија. Во оваа докторска дисертација е развиена нова оптимизациска метода за поефикасно решавање на проблемот за ОКРДМ, во услови на несигурност во потрошувачката. Развиената метода се базира на принципите на РО согласно податоците презентирани во поглавје 2, каде несигурната променлива се дефинира со соодветен интервал на несигурност.

## 5.2 Дефинирање на проблемот за ОКРДМ

На сликата 5.1 е прикажан граф на СДМ со номинален напон од  $V_n = 10 \text{ kV}$ . Во мрежата има еден напоен јазол, 24 потрошувачки јазли и 42 гранки. Секој од 24-те потрошувачки јазли напојува НДМ преку соодветен трансформатор среден на низок напон. Потрошувачи кои се напојуваат во секоја од 24-те НДМ се од типот домаќинство. Повеќе податоци за елементите од СДМ се дадени во поглавје 7.

Со очекуваниот зголемен број на ЕВ и ФП кои се приклучуваат во НДМ, постапката за прогноза на врвната моќност со која ќе биде оптоварена СДМ станува се потешка. Токму затоа, активната моќност за секој од 24-те потрошувачки јазли во СДМ ќе биде дефинирана со интервал на несигурност. Екстремните вредности од интервалот

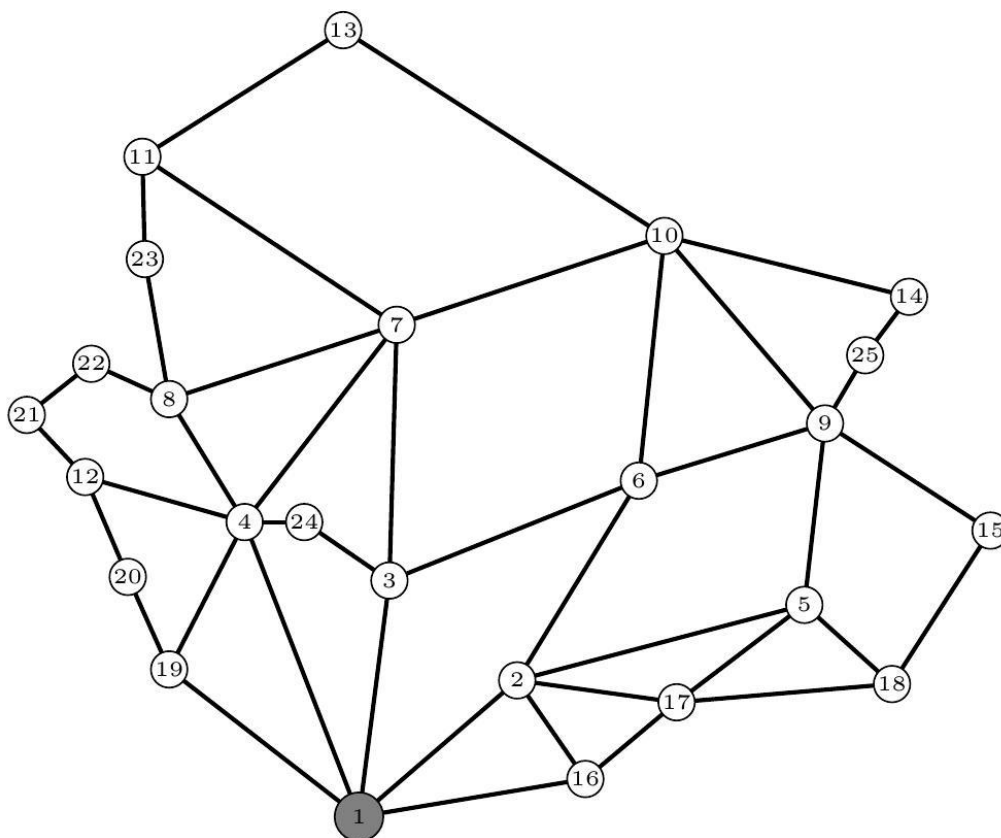


на несигурност зависат од бројот на домаќинства, ЕВ и ФП приклучени на НДМ и се одредуваат согласно стохастичкиот модел презентирани во поглавје 3.

Главната цел на оваа оптимизациска метода е да ја одреди оптималната конфигурација на СДМ од множество на можни патеки прикажани на слика 5.1. Добиената мрежа треба да биде со радијална топологија и да ги задоволува сите технички ограничувања во услови на најнеповолна распределба на несигурната потрошувачка. Трошоците за оптимално планирање на СДМ се пресметуваат на годишно ниво. Најзначајни параметри кои влијаат на решението се:

- инвестициски трошоци,
- трошоци поради загуби на електрична енергија во СДМ,
- трошоци поради неиспорачана електрична енергија во случај на испад на вод од СДМ [72].

Проблемот за ОКРДМ најчесто се користи при долгорочно планирање на радијални ДМ. Бидејќи постои можност моделот да се преформулира и да понуди решение за оптимално проширување на постојна радијална мрежа, во оваа докторска дисертација се анализирани и двете сценарија.



Слика 5.1 Граф на СДМ

### 5.3 Оптимизациски метод за ОКРДМ во услови на детерминистички моделирана потрошувачка

Оптимизацискиот метод за одредување на оптимална конфигурација на СДМ прикажана на слика 5.1 се заснова на математичка оптимизација мешано целобројно програмирање. Во методот, системската променлива е бинарна и дава решение при детерминистички моделирани вредности за потрошувачката во јазлите од СДМ. За

развивање на оптимизациски метод, кој ќе понуди робусно и оптимално решение дури и при најнеповолна распределба на несигурната потрошувачка, потребно е да се надогради оптимизацискиот метод со детерминистички моделирана потрошувачка, согласно ДПО алгоритмот презентираан во потпоглавје 2.3.2.

Функцијата на цел при детерминистички моделирана потрошувачка е даден со следниот израз:

$$\min_{b,P,V,U} g \sum_{i \in \mathcal{L}} c_i b_i + c_u \alpha \sum_{i \in \mathcal{L}} \lambda_i d_i |P_i| + 8760 c_i \beta \sum_{i \in \mathcal{L}} R_i \frac{(1 + tg^2 \varphi)}{V_n^2} P_i^2. \quad (5.1)$$

Бидејќи функцијата на цел се пресметува за период од една година, првиот дел од изразот (5.1) се однесува на капиталните инвестициски трошоци, каде трошоците за поставување на секој вод  $c_i$  се множат со бинарна системска променлива  $b_i$  која одлучува кој вод ќе биде вклучен во конечното решение. Трошоците за поставување на водот се множат со стапката на актуализација  $g$ . Вториот дел од функцијата на цел ги зема предвид трошоците поради неиспорачана електрична енергија во услови на испад на некој од водовите, каде:  $c_u$  е единечната цена за неиспорачана електрична енергија,  $\alpha$  е факторот на оптоварување,  $\lambda_i$  е веројатноста за испад на водот  $i$ ,  $d_i$  е времето потребно за санирање на повредениот вод  $i$  и  $P_i$  е активната моќност во повредената гранка. Третиот дел од функцијата на цел се однесува на годишните трошоци поради технички загуби на електрична енергија во СДМ. Битно е да се напомене дека тековите на моќност во мрежата се пресметуваат со константна вредност за факторот на реактивна моќност  $tg\varphi$ , за секој од 24-те потрошувачи. Факторот на загуби  $\beta$  се пресметува согласно изразот (4.10).

Функцијата на цел (5.1) е ограничена со следните изрази:

$$\sum_{i \in \mathcal{L}} b_i = n_b - 1, \quad (5.2)$$

$$b_i \in \{0,1\}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.3)$$

$$V_1 = V_s, \quad (5.4)$$

$$V_i \geq \underline{V}_i, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (5.5)$$

$$P_i = \frac{b_i(V_j^2 - V_k^2)}{2(R_i + X_{it}tg\varphi)} = \frac{b_i U_i}{2(R_i + X_{it}tg\varphi)}, \quad \text{line } (j - k), i \in \mathcal{L}, \quad (5.6)$$

$$-\bar{P}_i \leq P_i \leq \bar{P}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.7)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j = -P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (5.8)$$

каде  $\bar{P}_i = \sqrt{3} V_n \bar{I}_i \cos \varphi$ .

Со изразите (5.2) и (5.3) се дефинира системска променлива  $b_i$  како вектор со број на елементи еднаква на вкупниот број на расположливи гранки од СДМ. Секоја гранка од мрежата си има свој соодветен претставник во векторот  $b_i$ . Доколку од решението на оптимизациската процедура, за вредноста на еден елемент од векторот  $b_i$  се добие вредност еднаква на 1, тоа значи дека соодветната гранка која одговара на тој елемент ќе биде вклучена во конечното решение.

Изразот (5.4) ја ограничува вредноста на напонот на напојниот јазол од мрежата, а изразот (5.5) воведува ограничување според кое напоните на сите јазли во мрежата мора да бидат поголеми од минимално дозволената вредност на напонот  $\underline{V}_i$ .

Активната моќност во гранката  $i$  се дефинира согласно изразот (5.6). Таа е пропорционална на разликата од квадратот на напоните на почетокот и крајот на гранката, а обратно пропорционална од изразот  $2(R_i + X_i \operatorname{tg} \varphi)$ . Со цел избегнување на математички модел кој припаѓа во класата на мешано целобројно нелинеарно програмирање, за сите потрошувачи во мрежата е земен еднаков фактор на моќност  $\cos \varphi$ . Ова упростување не влијае значително на крајниот резултат, а воедно овозможува линеаризација на изразот за активна моќност преку уважување на изразот за реактивна моќност:

$$Q_i = P_i \operatorname{tg} \varphi, \quad i \in \mathcal{L}. \quad (5.9)$$

Множењето  $b_i U_i$ , каде  $b_i$  е бинарна променлива, а  $U_i$  е континуирана променлива со која се дефинира разликата од квадратот на напоните на почетокот и крајот од гранката  $i$ , може да се линеаризира со добро дефинирани гранични вредности на  $U_i$  [73]. Граничните вредности за разликата од квадратот на напонот на почетокот и на крајот на гранката се дефинираат како:

$$-V_n^2 \leq U_i \leq V_n^2, \quad i \in \mathcal{L}. \quad (5.10)$$

Конечно, со воведување на нова континуирана променлива  $F_i$ , изразот  $b_i U_i$  се линеаризира со следните изрази:

$$-V_n^2 b_i \leq F_i \leq V_n^2 b_i, \quad (5.11)$$

$$U_i - V_n^2(1 - b_i) \leq F_i \leq U_i + V_n^2(1 - b_i). \quad (5.12)$$

Со изразот (5.7) се воведува ограничување според кое се условуваат тековите на активна моќност низ водовите да не бидат поголеми од максимално дозволените  $\overline{P}_i$ . Елементите од матрицата на инциденција  $\mathbf{A}$  се внесуваат согласно правилата презентирани во изразот (4.11). Со нејзина помош на ефикасен начин се дефинира ограничувањето за биланс на моќност за секој од јазлите во мрежата. Во услови кога сите потрошувачки јазли од мрежата имаат ангажирана моќност различна од нула, изразот (5.2) во спрега со ограничувањето за биланс на моќности (5.8), гарантира дека оптималното решение ќе биде радијална мрежа во која нема да има затворени контури [74].

Како што беше елаборирано во потпоглавје 4.4, кога математичката функција апсолутна вредност се појавува во даден оптимизациски проблем, потребно е истата да се упрости со воведување на нова континуирана променлива. Бидејќи пред изразот  $|P_i|$  во функцијата на цел имаме позитивен знак, а бараме минимална вредност од функција на цел, за секоја од гранките во мрежата се воведува нова континуирана променлива  $H_i$  и соодветните изрази:

$$H_i \geq -P_i, \quad (5.13)$$

$$H_i \geq P_i. \quad (5.14)$$

Со цел поедноставување на изразите за функцијата на цел и ограничувањата, како и поради припрема на моделот за компјутерска обработка, се препорачува воведување на следните вектори  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{Y}$ , со податоци за секоја од гранките во мрежата:

$$C_i = g c_i, \quad (5.15)$$

$$\Lambda_i \geq c_u \alpha \lambda_i d_i, \quad (5.16)$$

$$L_i = \frac{8760 c_i \beta R_i (1 + t g^2 \varphi)}{V_n^2}, \quad (5.17)$$

$$Y_i = \frac{1}{2(R_i + X_i t g \varphi)}. \quad (5.18)$$

Дополнително, дефинираме вектор  $\mathbf{W}$  чии елементи се еднакви на квадратот од напоните ( $W_i = V_i^2, i \in \mathcal{B}$ ) и вектор  $\mathbf{U}$  чии елементи се еднакви на разликите од квадратот на напоните на почетокот и крајот на секоја гранка  $i$ .

Со воведување на векторите  $\mathbf{C}, \mathbf{L}, \mathbf{\Lambda}, \mathbf{Y}, \mathbf{W}$  и  $\mathbf{U}$ , како и со воведување на континуираните променливи потребни за линеаризација на изразите  $|P_i|$  и  $b_i U_i$ , функцијата на цел го добива обликот:

$$\min_{b, P, W, U, F, H} \sum_{i \in \mathcal{L}} C_i b_i + \Lambda_i H_i + L_i P_i^2. \quad (5.19)$$

Со ограничувања:

$$\sum_{i \in \mathcal{L}} b_i = n_b - 1, \quad (5.20)$$

$$b_i \in \{0, 1\}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.21)$$

$$W_1 = V_s^2, \quad (5.22)$$

$$W_i \geq \underline{W}_i, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (5.23)$$

$$U_i = \sum_{j \in \mathcal{B}} A_{j,i} W_j, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.24)$$

$$F_i = P_i Y_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.25)$$

$$-\bar{P}_i \leq P_i \leq \bar{P}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.26)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j = -P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (5.27)$$

$$-V_n^2 b_i \leq F_i \leq V_n^2 b_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.28)$$

$$U_i - V_n^2 (1 - b_i) \leq F_i \leq U_i + V_n^2 (1 - b_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.29)$$

$$H_i \geq -P_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.30)$$

$$H_i \geq P_i, \quad i \in \mathcal{L}. \quad (5.31)$$

#### 5.4 Оптимизациски метод за ОКРДМ во услови на несигурна потрошувачка

Со оптимизацискиот метод за решавање на проблемот за ОКРДМ развиен во претходното потпоглавје, се добива решение за анализираниот проблем со користење на еднозначни вредности за моќноста во јазлите од СДМ. За развивање на оптимизациски метод каде ќе биде земена предвид несигурната потрошувачка, потребно е основниот метод да се прошири со дополнителни ограничувања. Во литературата постојат два општи алгоритми кои може да се употребат за таа цел: ДПО и БДЗ алгоритмот. За развивање на оптимизациски метод за ОКРДМ во услови на несигурна потрошувачка,

ќе се употреби ДПО алгоритмот бидејќи е поефикасен и има поширока примена од аспект на различните типови на математичка оптимизација врз кои може да се примени.

Најпрво, потребно е да се воведат дополнителни ограничувања со кои ќе се дефинираат границите на несигурната променлива. Во случајот на ОКРДМ, несигурната променлива е активната моќност за секој од потрошувачките јазли во СДМ. Според тоа, активната моќност ќе биде дефинирана со соодветен интервал на несигурност. Граничните вредности од интервалот на несигурност  $[P_{d_i}, \bar{P}_{d_i}]$ , за секој од јазлите  $i$  од СДМ, ќе бидат одредени согласно стохастичкиот модел за потрошувач од типот домаќинство, опишан во поглавје 3 од оваа докторска дисертација. Несигурната променлива  $P_{d_i}$  ќе биде дефинирана исто како и при решавање на проблемот за ОСПВ во потпоглавје 4.4:

$$\underline{P}_{d_i} = P_{d_i}^{ref} - P_{d_i}^{\Delta}, \quad (5.32)$$

$$\bar{P}_{d_i} = P_{d_i}^{ref} + P_{d_i}^{\Delta}, \quad (5.33)$$

$$\underline{P}_{d_i} \leq P_{d_i} \leq \bar{P}_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (5.34)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{D}} |P_{d_i} - P_{d_i}^{ref}| \leq \Gamma \cdot \sum_{i \in \mathcal{D}} P_{d_i}^{\Delta}, \quad (5.35)$$

каде  $P_{d_i}^{ref}$  и  $P_{d_i}^{\Delta}$  се референтната моќност и нејзиното отстапување. Со претходно дефинираните изрази дозволуваме несигурната променлива  $P_{d_i}$  да варира околу својата референтна вредност во границите на интервалот на несигурност. Со воведување на параметарот  $\Gamma$ , постои уште една можност за фина регулација на степенот на варијабилност на несигурната променлива  $P_{d_i}$ .  $\Gamma$  може да биде било кој реален број во интервалот од 0 до 1. Во случајот кога  $\Gamma = 0$ , несигурната променлива ќе биде еднаква на референтната ( $P_{d_i} = P_{d_i}^{ref}$ ). Во случајот кога  $\Gamma = 1$ , несигурната променлива може да варира до своите екстремни вредности ( $P_{d_i} = P_{d_i}^{ref} \pm P_{d_i}^{\Delta}$ ).

Бидејќи во изразот (5.35) се појавува математичка операција апсолутна вредност, потребно е тој израз да се линеаризира. Тоа го постигнуваме со воведувањето на континуирана променлива  $t$  и изразите:

$$t_i \geq P_{d_i} - P_{d_i}^{ref}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (5.36)$$

$$t_i \geq P_{d_i}^{ref} - P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}. \quad (5.37)$$

Целта на примената на методот на РО е да се добие најекономично решение кое ќе ги задоволи сите ограничувања дури и при најнеповолна распределба на несигурната потрошувачка. Во случајот на ОКРДМ, целта е да се добие решение за најекономична топологија за радијалната СДМ. Во решението треба да бидат исполнети сите технички ограничувања. За таа цел, се воведува дво-фазната функција на цел за проблемот на ОКРДМ:

$$\min_{b, P, W, U, F, H} \max_{P_d} \sum_{i \in \mathcal{L}} C_i b_i + \Lambda_i H_i + L_i P_i^2. \quad (5.38)$$

Со ограничувања:

$$\sum_{i \in \mathcal{L}} b_i = n_b - 1, \quad (5.39)$$

$$b_i \in \{0,1\}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.40)$$

$$W_1 = V_s^2, \quad (5.41)$$

$$W_i \geq \underline{W}_i, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (5.42)$$

$$U_i = \sum_{j \in \mathcal{B}} A_{j,i} W_j, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.43)$$

$$F_i = P_i Y_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.44)$$

$$-\bar{P}_i \leq P_i \leq \bar{P}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.45)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j = -P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (5.46)$$

$$-V_n^2 b_i \leq F_i \leq V_n^2 b_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.47)$$

$$U_i - V_n^2(1 - b_i) \leq F_i \leq U_i + V_n^2(1 - b_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.48)$$

$$H_i \geq -P_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.49)$$

$$H_i \geq P_i, \quad i \in \mathcal{L}. \quad (5.50)$$

$$\underline{P}_{d_i} \leq P_{d_i} \leq \bar{P}_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (5.51)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{D}} t_i \leq \Gamma \cdot \sum_{i \in \mathcal{D}} P_{d_i}^\Delta. \quad (5.52)$$

$$t_i \geq P_{d_i} - P_{d_i}^{ref}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (5.53)$$

$$t_i \geq P_{d_i}^{ref} - P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}. \quad (5.54)$$

#### 5.4.1 Дефинирање на потпроблемот за ОКРДМ

Согласно податоците за ДПО алгоритмот презентирани во потпоглавје 2.3.2, дво-фазниот израз со кој се опишува РО треба да се подели на главен проблем и потпроблем. Бидејќи станува збор за итеративна постапка, вредностите добиени за системската променлива  $b_i^{(k-1)}$  со решавање на главниот проблем од претходната итерација, се проследуваат до потпроблемот. Со решавање на потпроблемот, се добива најнеповолната распределба на несигурната потрошувачка  $P_{d_i}^{(k)}$  од тековната итерација. За решавање на потпроблемот во првата итерација се користат вредностите за системската променлива  $b_i^{(0)}$  добиена од решавање на оптимизацискиот метод за ОКРДМ при детерминистички моделирани вредности за активната моќност на потрошувачите јазли.

Бидејќи системската променлива добиена со решавање на претходната итерација е позната, во потпроблемот истата е дефинирана како параметар со позната вредност, а не како променлива. Потпроблемот за ОКРДМ се опишува со максимум од функцијата на цел бидејќи со неа се бара најнеповолната распределба на несигурната потрошувачка  $P_{d_i}$ . Функцијата на цел од потпроблемот е дефинирана со следниот израз:

$$\max_{P_d, t, P, W, U, H, B} \sum_{i \in \mathcal{L}} \Lambda_i H_i + L_i P_i^2. \quad (5.55)$$

Со ограничувања:

$$W_1 = V_s^2, \quad (5.56)$$

$$W_i \geq \underline{W}_i, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (5.57)$$

$$U_i = \sum_{j \in \mathcal{B}} A_{j,i} W_j, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.58)$$

$$P_i = Y_i b_i^{(k-1)} U_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.59)$$

$$-\bar{P}_i \leq P_i \leq \bar{P}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.60)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j = -P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (5.61)$$

$$P_i + M_i B_i \geq H_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.62)$$

$$-P_i + M_i(1 - B_i) \geq H_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.63)$$

$$H_i \geq P_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.64)$$

$$H_i \geq -P_i, \quad i \in \mathcal{L}. \quad (5.65)$$

$$\underline{P}_{d_i} \leq P_{d_i} \leq \bar{P}_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (5.66)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{D}} t_i \leq \Gamma \cdot \sum_{i \in \mathcal{D}} P_{d_i}^\Delta. \quad (5.67)$$

$$t_i \geq P_{d_i} - P_{d_i}^{ref}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (5.68)$$

$$t_i \geq P_{d_i}^{ref} - P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (5.69)$$

каде  $M = 2\bar{P}$  и  $B_i \in \{0,1\}$  за  $i \in \mathcal{L}$ .

Бидејќи системската променлива во потпроблемот е дефинирана како параметар со позната вредност, во ограничувањата од потпроблемот се изоставени оние ограничувања кои се однесуваат на  $b_i$ .

Изразот за апсолутна вредност на моќноста низ гранката е вклучен во функцијата на цел од која се бара максимална вредност. За линеаризација на  $|P_i|$  се воведуваат континуираната променлива  $H_i$  и бинарната променлива  $B_i$ . Ограничувањата кои се однесуваат на оваа линеаризација се нумерирани од (5.62) до (5.65).

Кога  $B_i = 0$ , ограничувањата потребни за линеаризација на  $|P_i|$  се:  $P_i \geq H_i$ ,  $-P_i + M_i \geq H_i$ ,  $H_i \geq P_i$  и  $H_i \geq -P_i$ . Во овој случај, активно е ограничувањето  $P_i \geq H_i$ .  $P_i$  има позитивна вредност и е поголемо од  $H_i$  бидејќи  $H_i$  е секогаш позитивно. Со доволно голема вредност за  $M_i$  второто ограничување е секогаш исполнето. Третото ограничување вели дека  $H_i$  мора да биде поголемо или еднакво на  $P_i$  и во комбинација со првото ограничување следува дека  $H_i = P_i$ . Четвртото ограничување е секогаш исполнето.

Кога  $B_i = 1$ , ограничувањата потребни за линеаризација на  $|P_i|$  се:  $P_i + M_i \geq H_i$ ,  $-P_i \geq H_i$ ,  $H_i \geq P_i$  и  $H_i \geq -P_i$ . Во овој случај, активно е ограничувањето  $-P_i \geq H_i$  и  $P_i$  мора да биде со негативна вредност. Со доволно голема вредност за  $M_i$  првото

ограничување е секогаш исполнето. Бидејќи  $P_i$  е негативно, третото ограничување е секогаш исполнето. Од четвртото и второто ограничување следува дека  $H_i = -P_i$ .

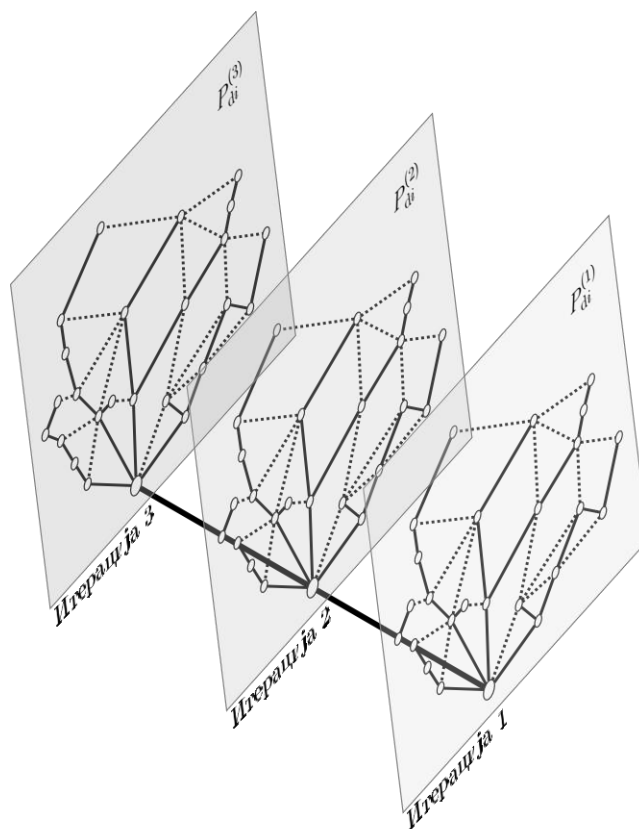
Потпроблемот спаѓа во класата на мешано целобројно програмирање. Бидејќи имаме фиксна вредност за системската променлива  $b_i^{(k-1)}$  добиена со решавање на главниот проблем од претходната итерација, решението кое го добиваме од потпроблемот во тековната итерација можеби не е најдоброто. Но, со решавање на потпроблемот можеме да ја пресметаме ГТВ за тековната итерација со следниот израз:

$$\text{ГТВ}_k = \sum_{i \in \mathcal{L}} C_i b_i^{(k-1)} + \text{OBJ}_k, \quad (5.70)$$

каде со  $\text{OBJ}_k$  е дефинирана вредноста добиена од функцијата на цел добиена со решавање на потпроблемот во итерацијата  $k$ .

#### 5.4.2 Дефинирање на главниот проблем за ОКРДМ

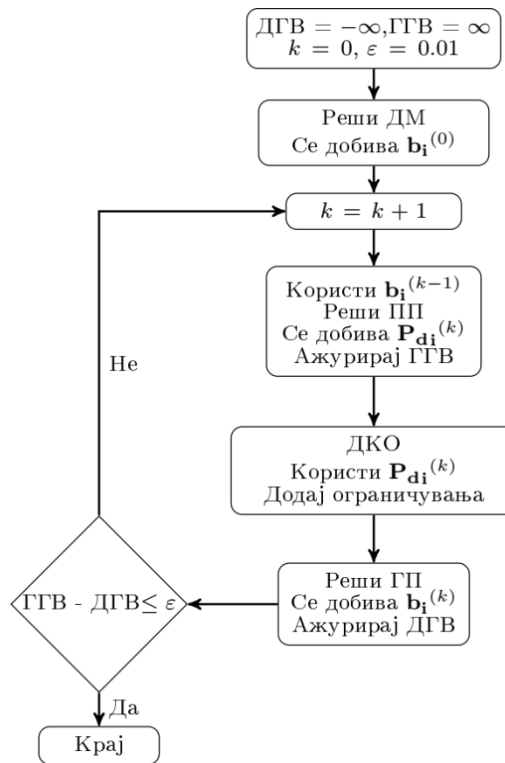
За решавање на главниот проблем од тековната итерација  $k$ , се користат вредностите за несигурната променлива  $P_d^{(k)}$ , кои се добиени со решавање на потпроблемот во сите претходни итерации  $k = 1, 2, \dots$ . Во секоја итерација, бројот на ограничувања во главниот проблем се зголемува преку воведување на дополнителни ограничувања за новодобиените вредности за  $P_d$ . Всушност, во секоја итерација додаваме нова мрежа за која важат истите ограничувања, но со различни вредности за  $P_{d_i}$ , што повлекува нови вредности за системските променливи:  $P^{(k)}, W^{(k)}, U^{(k)}, H^{(k)}$  и  $F^{(k)}$ . Сите новододадени мрежи се напојуваат од иста напојна точка како што е прикажано на слика 5.2. Добиеното решение од последната итерација мора да ги задоволува ограничувањата во сите додадени мрежи.



Слика 5.2 Додавање променливи и ограничувања во главниот проблем



Во прв момент, главниот проблем ги вклучува само ограничувањата (5.2) и (5.3) од основниот проблем, кои се однесуваат на системската променлива  $b_i$ . Во секоја итерација се додаваат ограничувањата што соодветствуваат на вредноста на  $P_{d_i}^{(k)}$  од тековната итерација. Во функцијата на цел од главниот проблем потребно е да се земе предвид најголемиот оперативен трошок кој се јавува во било која од мрежите прикажани на слика 5.2. Тоа се постигнува со додавање на ограничувањето (5.74) во главниот проблем.



Слика 5.3 Дијаграм на ДПО алгоритам за решавање на ОКРДМ

Функцијата на цел од главниот проблем е дефинирана со следниот израз:

$$\min_{b, \eta, P^{(k)}, W^{(k)}, U^{(k)}, H^{(k)}, F^{(k)}} \sum_{i \in \mathcal{L}} C_i b_i + \eta. \quad (5.71)$$

Со ограничувања:

$$\sum_{i \in \mathcal{L}} b_i = n_b - 1, \quad (5.72)$$

$$b_i \in \{0, 1\}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.73)$$

$$\eta \geq \sum_{i \in \mathcal{L}} \Lambda_i H_i^{(k)} + L_i P_i^{(k)^2} \quad (5.74)$$

$$W_1^{(k)} = V_s^2, \quad (5.75)$$

$$W_i^{(k)} \geq \underline{W}_i, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (5.76)$$

$$U_i^{(k)} = \sum_{j \in \mathcal{B}} A_{j,i} W_j^{(k)}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.77)$$

$$F_i^{(k)} = P_i^{(k)} Y_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.78)$$

$$-\bar{P}_i \leq P_i^{(k)} \leq \bar{P}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.79)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j^{(k)} = -P_{d_i}^{(k)}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (5.80)$$

$$-V_n^2 b_i \leq F_i^{(k)} \leq V_n^2 b_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.81)$$

$$U_i^{(k)} - V_n^2(1 - b_i) \leq F_i^{(k)} \leq U_i^{(k)} + V_n^2(1 - b_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.82)$$

$$H_i^{(k)} \geq -P_i^{(k)}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.83)$$

$$H_i^{(k)} \geq P_i^{(k)}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (5.84)$$

каде  $k = 1, 2, \dots$  претставува бројач за тековната итерација.

Со решавањето на главниот проблем во тековната итерација, ДГВ може да се пресмета со користење на следниот израз:

$$\text{ДГВ}_k = \sum_{i \in \mathcal{L}} C_i b_i^{(k)} + \eta^{(k)}. \quad (5.85)$$

На слика 5.3 е прикажан дијаграмот за примена на ДПО алгоритмот за решавање на проблемот за ОКРДМ. Со изразот (5.86) е дефиниран услов за прекин на итеративниот процес:

$$\text{ГГВ}_k - \text{ДГВ}_k \leq \epsilon, \quad (5.86)$$

Каде  $\epsilon$  е прифатливата грешка во разликата помеѓу ГГВ добиена со решавање на потпроблемот и ДГВ добиена со решавање на главниот проблем. Вредностите за системската променлива  $b_i^{(k)}$  и  $\text{ДГВ}_k$  добиени со решавање на главниот проблем во последната итерација, ја одредуваат конечната топологија на СДМ и вредноста на функцијата на цел соодветно.

## **6 ОПТИМАЛНА КОНФИГУРАЦИЈА НА РАДИЈАЛНА ДИСТРИБУТИВНА МРЕЖА – ОПТИМАЛНА ЛОКАЦИЈА И ДИМЕНЗИОНИРАЊЕ НА СТАТИЧНИ БАТЕРИСКИ СИСТЕМИ**

Со цел продлабочување на научните сознанија од аспект на оптимално планирање на ДМ во услови на несигурна потрошувачка, во оваа глава од докторската дисертација е извршено проширување на оптимизацискиот метод за ОКРДМ. За постигнување на таа цел, развиен е нов оптимизациски метод кој покрај тоа што дава решение за оптимална конфигурација на ДМ, предлага решение и за одредување на оптимална локација за поставување на СБС. Дополнително, од моделот се добиваат податоци за моќноста и енергијата со која треба да биде димензионирани СБС.

Идејата за поставување на СБС на ниво на ДМ веќе неколку децении е присутна во научните кругови. Постојат повеќе причини кои одат во насока на поставување на ваков вид на уреди во ДМ. Со интегрирање на ЕВ и единиците за производство на електрична енергија кои се базираат на ОИЕ во ДМ, сè повеќе се доведува во опасност доверливо работење на истите. Тоа се должи на непредвидливоста поврзана со производството и потрошувачката на електричната енергија, која е последица од интегрирањето на ваков тип на технологии. Воведувањето на СБС може да придонесе кон зголемување на доверливоста на ДМ во кои има зголемено присуство на ЕВ и ОИЕ. Дополнително, можни се и одредени финансиски придобивки од поставување на СБС, преку извршување на одредени системски услуги. Тоа се постигнува преку уважување на следните особености на СБС:

- можност за складирање на вишокот на електрична енергија (во ноќните часови кои се карактеризираат со ниско оптоварување и/или во оние делови од денот кога производните единици базирани на ОИЕ произведуваат поголемо количество на електрична енергија од потребите на потрошувачите),
- можност за користење на електрична енергија од СБС (во оние делови од денот кога за тоа има потреба, најчесто во моментите на врвно оптоварување во ДМ),
- нудење на системски услуги во однос на регулација на напонот во ДМ,
- нудење на системски услуги во однос на регулација на фреквенцијата во системот,
- користење на електрична енергија од СБС при прекин на напојувањето во ДМ преку креирање на островски напојувања и сл.

### **6.1 Преглед на научна литература од областа на ОКРДМ-ОЛДБС**

Авторите на [75] употребиле мешано целобројно програмирање за да решат проблем на оптимално проширување на радијална ДМ. Дополнително, моделот дава решение и за одредување на оптимална локација за поставување на СБС. Главна придобивка од развиениот модел е можноста да се изврши намалување на врвната моќност во ДМ, со што се остваруваат одредени финансиски придобивки. Друг труд во кој е изработен метод за оптимално проширување на радијална ДМ е [76]. Во него, авторите ги земаат предвид трошоците за поставување на водови, трансформаторски станици и СБС, како и трошоците за нивно одржување и евентуална нивна замена во рамки на анализираниот период. Развиениот алгоритам се базира на методот со внатрешна точка. Одлуката за изградба на нов напоен вод и/или поставување на СБС,

алгоритмот ја носи врз база на финансиска оправданост за складирање на електрична енергија во период на ниска тарифа и нејзина продажба во период на висока тарифа. Во трудот [77] се предлага метод кој се решава во две етапи, каде се истражуваат придобивките од поставување на СБС со цел нудење на системски услуги како што се регулација на напон и минимизирање на загубите во мрежата. Во првата етапа од методот решението е добиено со примена на ГА алгоритмот, каде покрај локацијата, се одредува и моќноста и капацитетот на СБС. Во втората етапа, со примена на софтверска алатка за одредување на оптимални текови на моќност, се врши евалуација на добиените резултати од првата етапа. Слично како во [77], и во трудот [78] развиен е метод кој дава решение во две етапи. Во првата етапа е искористен ГА алгоритмот за одредување на оптималната локација на СБС. Потоа, во втората етапа се користи софтверска алатка за одредување на оптималните текови на моќност, која воедно ги одредува и оптималните циклуси за полнење/празнење на СБС. Со решавање на ДМ за повеќе различни временски интервали се добиваат оптимални вредности за моќноста и капацитетот на СБС.

Приклучувањето на СБС во ДМ е област која е доста детално обработена од научната заедница. Сепак, во литературата недостасуваат оптимизациски методи кои овозможуваат анализа на добиените резултати во услови на несигурност на влезните податоци. Несигурноста на влезните податоци пред сè се однесува на несигурната потрошувачка поради сè поголемиот број на приклучени ЕВ и ОИЕ во НДМ. Оттаму и главната мотивација во оваа докторска дисертација за развивање на оптимизациски метод кој ќе го реши проблемот за ОКРДМ-ОЛДБС со примена на робусна оптимизација и соодветно ќе ја уважи несигурноста во потрошувачката на електрична енергија.

## 6.2 Дефинирање на проблемот за ОКРДМ-ОЛДБС

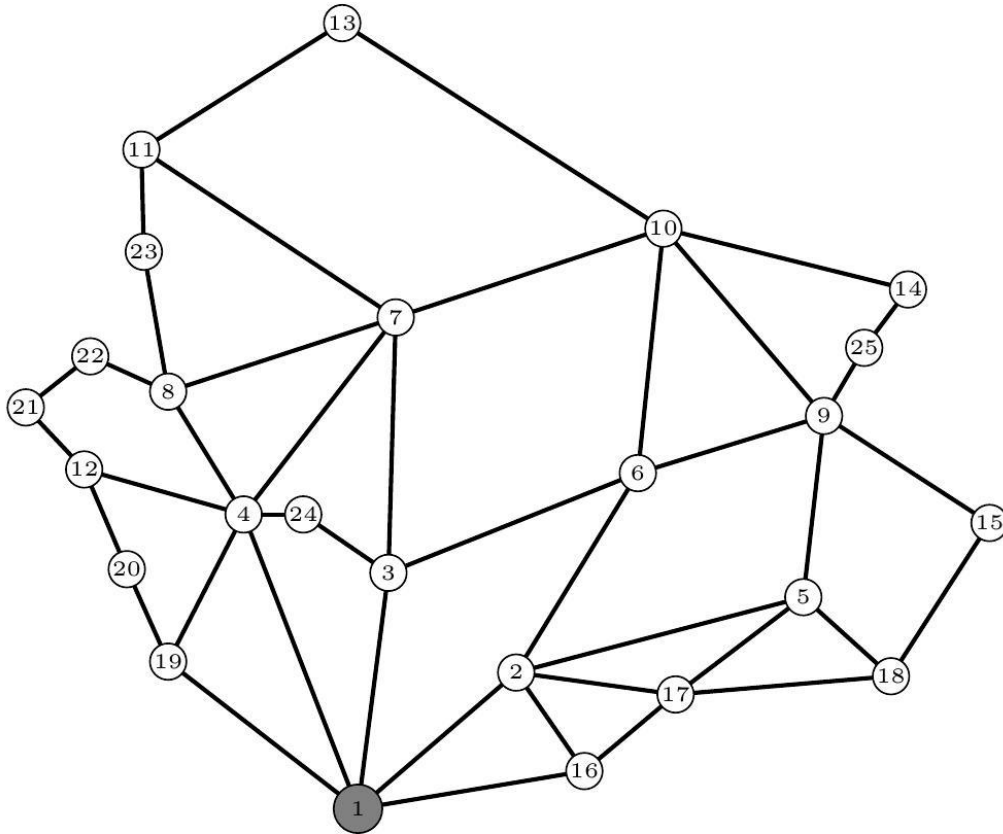
За СДМ прикажана на слика 6.1 потребно е да се одреди оптимална топологија на мрежата, оптимална локација за поставување, како и димензионирање на СБС. Прикажаната мрежа е иста како мрежата прикажана во потпоглавје 5.2. Номиналниот напон на СДМ е  $U_n = 10 \text{ kV}$ , мрежата има 24 потрошувачки јазли и 42 гранки. Дополнителни податоци за мрежата се презентирани во поглавје 7.

## 6.3 Оптимизациски метод за ОКРДМ-ОЛДБС во услови на детерминистички моделирана потрошувачка

Со цел одредување на оптимална топологија на СДМ прикажана на слика 6.1, како и одредување на оптимална локација на СБС во услови на несигурна потрошувачка, најпрво е потребно да се изработи оптимизациски метод во кој потрошувачката ќе биде детерминистички моделирана, а кој потоа ќе биде надограден во оптимизациски метод во кој ќе биде земена предвид несигурноста во потрошувачката. Основниот оптимизациски метод се базира на мешано целобројно програмирање каде се дефинирани две системски бинарни променливи. Слично како и во методот за ОКРДМ, првата бинарна променлива има за цел да одлучи кој од водовите ќе биде вклучен во конечното решение. Втората бинарна променлива има за цел да одлучи во кои јазли од мрежата е потребно да се постават СБС.

Иако овој оптимизациски метод претставува проширување на методот за ОКРДМ презентирани во поглавје 5, во него има вклучено одредени параметри кои значително го диференцираат. Секако, доминантна разлика е во воведување на СБС во процесот на оптимизација. Дополнително, при одредување на оптимална состојба се земаат предвид

и оптоварувањата при различна вредност за реактивната моќност на поединечните потрошувачки јазли, што не е случај во дефинирањето на основниот оптимизациски метод за ОКРДМ презентирани во поглавје 5. Таквото уважување на различните фактори на реактивна моќност кај потрошувачките јазли го прави проблемот за ОКРДМ-ОЛДБС нелинеарен и потребно е истиот соодветно да се линеаризира.



Слика 6.1 Граф на СДМ

Исто како и оптимизацискиот метод за ОКРДМ, и ОКРДМ-ОЛДБС доминантно се користи во услови на долгорочно планирање на радијални ДМ. Сепак, со минимална корекција на системските променливи, постои можност истиот да се адаптира и да послужи за оптимално проширување на веќе постоечка ДМ. Методот наоѓа подеднаква примена при димензионирање на СДМ и на НДМ.

Функцијата на цел при детерминистички моделирана потрошувачка е дефинирана со следниот израз:

$$\min_{b,z,P_d,P_e} \sum_{i \in \mathcal{L}} [b_i C_i + L_i (P_i^2 + Q_i^2)] + \sum_{i \in \mathcal{E}} [C_{ESS_i} z_i + C_{EP} P_{e_i}] + C_{EE} \sum_{i \in \mathcal{S}} \beta(l)_i P_{e_i}. \quad (6.1)$$

Со ограничувања:

$$b_i \in \{0,1\}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.2)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{L}} b_i = n_b - 1, \quad (6.3)$$

$$W_1 = V_s^2, \quad (6.4)$$

$$\widetilde{W}_1 = V_s^2, \quad (6.5)$$

$$W_i \geq \underline{V}_i^2, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (6.6)$$

$$\tilde{W}_i \geq \underline{V}_i^2, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (6.7)$$

$$U_i = \sum_{j \in \mathcal{B}} A_{j,i} W_j, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.8)$$

$$\tilde{U}_i = \sum_{j \in \mathcal{B}} A_{j,i} \tilde{W}_j, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.9)$$

$$-b_i \bar{S}_i \leq P_i \leq b_i \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.10)$$

$$-b_i \bar{S}_i \leq \tilde{P}_i \leq b_i \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.11)$$

$$-b_i \bar{S}_i \leq Q_i \leq b_i \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.12)$$

$$-b_i \bar{S}_i \leq \tilde{Q}_i \leq b_i \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.13)$$

$$-b_i \bar{S}_i \sqrt{2} \leq P_i + Q_i \leq b_i \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.14)$$

$$-b_i \bar{S}_i \sqrt{2} \leq P_i - Q_i \leq b_i \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.15)$$

$$-b_i \bar{S}_i \sqrt{2} \leq \tilde{P}_i + \tilde{Q}_i \leq b_i \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.16)$$

$$-b_i \bar{S}_i \sqrt{2} \leq \tilde{P}_i - \tilde{Q}_i \leq b_i \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.17)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j = -(P_{d_i} - P_{e_i}), \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.18)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} Q_j = -Q_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.19)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} \tilde{P}_j = -\lambda P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.20)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} \tilde{Q}_j = -Q_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.21)$$

$$F_i = 2(P_i R_i + Q_i X_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.22)$$

$$\tilde{F}_i = 2(\tilde{P}_i R_i + \tilde{Q}_i X_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.23)$$

$$-V_n^2 b_i \leq F_i \leq V_n^2 b_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.24)$$

$$-V_n^2 b_i \leq \tilde{F}_i \leq V_n^2 b_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.25)$$

$$U_i - V_n^2(1 - b_i) \leq F_i \leq U_i + V_n^2(1 - b_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.26)$$

$$\tilde{U}_i - V_n^2(1 - b_i) \leq \tilde{F}_i \leq \tilde{U}_i + V_n^2(1 - b_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.27)$$

$$z_i \in \{0,1\}, \quad i \in \mathcal{E}, \quad (6.28)$$

$$P_s = \sum_{i \in \mathcal{T}} P_i, \quad (6.29)$$

$$\tilde{P}_s = \sum_{i \in \mathcal{T}} \tilde{P}_i, \quad (6.30)$$

$$P_s = \sum_{i \in \mathcal{D}} \lambda P_{d_i}, \quad (6.31)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{E}} P_{e_i} = \sum_{i \in \mathcal{S}} P_{e_{L_i}}, \quad (6.32)$$

$$0 \leq P_{e_{L_i}} \leq \frac{1}{l} \sum_{j \in \mathcal{E}} \bar{P}_{e_j}, \quad i \in \mathcal{S}, \quad (6.33)$$

$$z_i P_{e_i} \leq P_{e_i} \leq z_i \bar{P}_{e_i}, \quad i \in \mathcal{E}, \quad (6.34)$$

каде се воведени следните вектори за поедноставен приказ и компјутерска обработка:

$$C_i = g c_i, \quad (6.35)$$

$$L_i = \frac{8760 c_l \beta_L R_i}{V_n^2}, \quad (6.36)$$

$$C_{ESS_i} = g_E c_{ESS_i}, \quad (6.37)$$

$$C_{EP} = g_E c_{EP}, \quad (6.38)$$

$$C_{EE} = \frac{g_E c_{EE}}{\mu_c}. \quad (6.39)$$

Изразот (6.1) е составен од пет поединечни годишни трошоци кои заедно ја дефинираат функцијата на цел. Првиот дел се однесува на капиталните инвестициски трошоци за изградба на напојните водови, претставени преку системската бинарна променлива  $b_i$ . Ако вредноста на  $b_i = 0$ , соодветниот напоен вод  $i$  не е вклучен во конечното решение. Вториот дел од функцијата на цел се однесува на годишните трошоци од загуба на електрична енергија во СДМ, преку уважување на факторот на загуби  $\beta_L$ . Третиот дел од функцијата на цел се однесува на трошоците за поставување на СБС. Системската бинарна променлива  $z_i$  претставува вектор со димензија еднаква на бројот на потрошувачки јазли во СДМ. Доколку вредноста на  $z_i = 0$ , во потрошувачкиот јазол  $i$  не се врши приклучување на СБС. Четвртиот и петтиот дел од функцијата на цел се однесуваат на инсталираната моќност и енергија на СБС.

Сите ограничувања од изразот (6.2) до (6.34) кои го имаат знакот тилда, се однесуваат на состојбата во СДМ кога СБС се празни и не испорачуваат електрична енергија. Ограничувањата (6.2) и (6.3) ја дефинираат системската бинарна променлива  $b_i$  и се услов за добивање на радијална мрежа. Изразите од (6.4) до (6.7) ги дефинираат квадратите на напоните за секој јазол  $i$ . Изразите (6.8) и (6.9) ја пресметуваат разликата на квадратите од напоните на почетокот и крајот на секоја гранка. Ограничувањето за тековите на активна и реактивна моќност согласно трајно дозволеното струјно оптоварување на водовите се постигнува со изразите (6.10)-(6.13). Ограничувањата од (6.14) до (6.17) се воведени за линеаризација на кругот кој ја претставува формулата за максимално дозволена привидна моќност во секоја гранка  $i$  од мрежата, дефинирана со изразот  $P_i^2 + Q_i^2 \leq \bar{S}_i^2$ . Оваа линеаризација е постигната со впишување на круг во два квадрати, каде секој од квадрат е ротиран за  $45^\circ$  во позитивна и негативна математичка насока. Изразите од (6.18) до (6.21) се користат за дефинирање на тековите на моќност во водовите од СДМ, со и без учество на СБС. Изразот  $b_i U_i = 2(P_i R_i + Q_i X_i)$  ја претставува напонската равенка од релаксираниот модел на вод. Изразот е нелинеарен поради множењето на една бинарна променлива  $b_i$ , со една континуирана променлива  $U_i$ . Слично како и во претходното поглавје, линеаризација на ова множење е постигнато со воведување на ограничувањата од (6.22) до (6.27). Ограничувањата од (6.29) до (6.31) се воведени за задоволување на билансот на моќности помеѓу напојниот јазол и моќноста од сите потрошувачи приклучени во СДМ. Изразите (6.32) и (6.33) служат за

пресметка на енергетскиот капацитет, а ограничувањето (6.34) служи за пресметка на моќноста на секој од поставените СБС.

#### 6.4 Оптимизациски метод за ОКРДМ-ОЛДБС во услови на несигурна потрошувачка

Оптимизацискиот метод за ОКРДМ-ОЛДБС во услови на несигурна потрошувачка е развиен врз база на оптимизацискиот метод презентирани во претходното потпоглавје. Воведувањето на несигурната потрошувачка во методот се постигнува со дефинирање на моќноста на потрошувачите во вид на променлива, ограничена со соодветни екстремни вредности дефинирани со интервалот на несигурност, а добиени со примена на стохастичкиот модел за потрошувач презентирани во поглавје 3.

Во однос на основниот оптимизациски метод за ОКРДМ, вклучувањето на СБС во процесот на оптимизација предвидува вклучување на дополнителна системска бинарна променлива  $z_i$ , како и вклучување на дополнителна променлива  $P_{e_i}$  со која се дефинира моќноста на батерискиот систем приклучен во јазолот  $i$ . Бидејќи трошоците за поставување на СБС се пропорционални на моќноста на батерискиот систем, а воедно истите се вклучени во вкупните трошоци со кои е дефинирана функцијата на цел, дво-фазната РО која се користи во поглавје 5 се надоградува и проширува во три-фазна РО. Функцијата на цел со која се опишува три-фазната РО е дефинирана со изразот:

$$\min_{b,z} \max_{P_d, Q_d} \min_{P_e} \sum_{i \in \mathcal{L}} [b_i C_i + L_i (P_i^2 + Q_i^2)] + \sum_{i \in \mathcal{E}} [C_{ESS_i} z_i + C_{EP} P_{e_i}] + C_{EE} \sum_{i \in \mathcal{S}} \beta(1)_i P_{e_i} L_i. \quad (6.40)$$

Со ограничувања:

$$b_i \in \{0,1\}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.41)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{L}} b_i = n_b - 1, \quad (6.42)$$

$$z_i \in \{0,1\}, \quad i \in \mathcal{E}. \quad (6.43)$$

Со ограничувања:

$$\underline{P}_{d_i} \leq P_{d_i} \leq \bar{P}_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.44)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{D}} |P_{d_i} - P_{d_i}^{ref}| \leq \Gamma \cdot \sum_{i \in \mathcal{D}} P_{d_i}^\Delta, \quad (6.45)$$

$$Q_{d_i} = \frac{Q_{d_i}^{ref}}{P_{d_i}^{ref}} \cdot P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.46)$$

$$t_i \geq P_{d_i} - P_{d_i}^{ref}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.47)$$

$$t_i \geq P_{d_i}^{ref} - P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}. \quad (6.48)$$

Со ограничувања:

$$W_1 = V_s^2, \quad (6.49)$$

$$\widetilde{W}_1 = V_s^2, \quad (6.50)$$

$$W_i \geq \underline{V}_i^2, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (6.51)$$



$$\tilde{W}_i \geq \underline{V}_i^2, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (6.52)$$

$$U_i = \sum_{j \in \mathcal{B}} A_{j,i} W_j, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.53)$$

$$\tilde{U}_i = \sum_{j \in \mathcal{B}} A_{j,i} \tilde{W}_j, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.54)$$

$$-b_i \bar{S}_i \leq P_i \leq b_i \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.55)$$

$$-b_i \bar{S}_i \leq \tilde{P}_i \leq b_i \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.56)$$

$$-b_i \bar{S}_i \leq Q_i \leq b_i \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.57)$$

$$-b_i \bar{S}_i \leq \tilde{Q}_i \leq b_i \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.58)$$

$$-b_i \bar{S}_i \sqrt{2} \leq P_i + Q_i \leq b_i \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.59)$$

$$-b_i \bar{S}_i \sqrt{2} \leq P_i - Q_i \leq b_i \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.60)$$

$$-b_i \bar{S}_i \sqrt{2} \leq \tilde{P}_i + \tilde{Q}_i \leq b_i \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.61)$$

$$-b_i \bar{S}_i \sqrt{2} \leq \tilde{P}_i - \tilde{Q}_i \leq b_i \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.62)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j = -(P_{d_i} - P_{e_i}), \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.63)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} Q_j = -Q_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.64)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} \tilde{P}_j = -\lambda P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.65)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} \tilde{Q}_j = -Q_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.66)$$

$$F_i = 2(P_i R_i + Q_i X_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.67)$$

$$\tilde{F}_i = 2(\tilde{P}_i R_i + \tilde{Q}_i X_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.68)$$

$$-V_n^2 b_i \leq F_i \leq V_n^2 b_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.69)$$

$$-V_n^2 b_i \leq \tilde{F}_i \leq V_n^2 b_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.70)$$

$$U_i - V_n^2(1 - b_i) \leq F_i \leq U_i + V_n^2(1 - b_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.71)$$

$$\tilde{U}_i - V_n^2(1 - b_i) \leq \tilde{F}_i \leq \tilde{U}_i + V_n^2(1 - b_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.72)$$

$$P_s = \sum_{i \in \mathcal{T}} P_i, \quad (6.73)$$

$$\tilde{P}_s = \sum_{i \in \mathcal{T}} \tilde{P}_i, \quad (6.74)$$

$$P_s = \sum_{i \in \mathcal{D}} \lambda P_{d_i}, \quad (6.75)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{E}} P_{e_i} = \sum_{i \in \mathcal{S}} P_{e_{L_i}}, \quad (6.76)$$

$$0 \leq P_{e_{L_i}} \leq \frac{1}{l} \sum_{j \in \mathcal{E}} \bar{P}_{e_j}, \quad i \in \mathcal{S}, \quad (6.77)$$

$$z_i P_{e_i} \leq P_{e_i} \leq z_i \bar{P}_{e_i}, \quad i \in \mathcal{E}, \quad (6.78)$$

Првиот блок со ограничувања, од изразот (6.41) до изразот (6.43), се однесува на првата фаза, односно на првиот „min“ дел од функцијата на цел. Овие ограничувања се однесуваат на системските бинарни променливи  $b_i$  и  $z_i$  кои ќе бидат вклучени само во главниот проблем при адаптирање на општиот ДПО алгоритам. Во потпроблемот, системските променливи се дефинирани како константи со позната вредност добиена со решавање на главниот проблем од претходната итерација.

Вториот блок со ограничувања, од изразот (6.44) до (6.48), се однесуваат на несигурната променлива дефинирана како несигурна потрошувачка. За разлика од несигурната потрошувачка дефинирана во основниот оптимизациски метод за ОКРДМ презентирани во поглавје 5, во овој метод се зема предвид и можноста за одбирање на различна вредност за реактивна моќност за секој јазол од СДМ. Овој блок на ограничувања се однесува на втората фаза од РО модел, односно на „max“ делот од функцијата на цел. Овие ограничувања се користат за одредување на вредноста на несигурната променлива, односно, се користат само при дефинирање на потпроблемот. Со решавање на потпроблемот се добиваат вредности за несигурната променлива кои се користат за проширување на главниот проблем во тековната итерација.

Третиот блок со ограничувања, почнувајќи од изразот (6.49) до изразот (6.78), се однесуваат на мрежните системски ограничувања со кои се дефинираат физичките процеси во СДМ. Овие ограничувања се користат за дефинирање на главниот проблем и потпроблем во развиениот метод.

#### 6.4.1 Дефинирање на потпроблемот за ОКРДМ-ОЛДБС

Анализираниот проблем за ОКРДМ-ОЛДБС припаѓа во класата на три-фазна РО. За да може истата да се реши со примена на ДПО алгоритамот, потребно е втората и третата фаза да се обединат во една функција на цел, од која оптимизацискиот метод треба да ја пресмета максималната вредност. Со обединувањето на овие две фази всушност се дефинира потпроблемот од оптимизацискиот метод.

За да може да се обединат втората и третата фаза, потребно е да се применат принципите на дуално програмирање. За третата „min“ фаза од функцијата на цел се дефинира дуална функција, која во овој случај ќе ја пребарува максималната вредност од дуалната функција на цел. Бидејќи оптимизацискиот метод за ОКРДМ-ОЛДБС припаѓа во класата на мешано целобројно програмирање, не постои можност за директна примена на правилата за јака дуалност (анг. “strong duality”). Затоа, потребно е да се применат правилата за слаба дуалност (анг. “weak duality”), преку користење на ККТ условите дефинирани со:

- примарни ограничувања,
- ограничувањата за дуалните променливи (Лагранжов множител) да бидат поголеми или еднакви на 0,
- прв извод од Лагранжова функција во однос на сите примарни променливи,

- ограничувања за примена на комплементарна опуштеност (ang. “complementary slackness”)

Според тоа, за потпроблемот за ОКРДМ-ОЛДБС, функцијата на цел е дефинирана со изразот:

$$+ \max_{P_d, Q_d, P_e} \sum_{i \in \mathcal{L}} L_i(P_i^2 + Q_i^2) + \sum_{i \in \mathcal{E}} C_{EP} P_{e_i} + C_{EE} \sum_{i \in \mathcal{S}} \beta(l)_i P_{eL_i}. \quad (6.79)$$

Со ограничувања:

$$\underline{P}_{d_i} \leq P_{d_i} \leq \bar{P}_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.80)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{D}} |P_{d_i} - P_{d_i}^{ref}| \leq \Gamma \cdot \sum_{i \in \mathcal{D}} P_{d_i}^{\Delta}, \quad (6.81)$$

$$Q_{d_i} = \frac{Q_{d_i}^{ref}}{P_{d_i}^{ref}} \cdot P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.82)$$

$$t_i \geq P_{d_i} - P_{d_i}^{ref}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.83)$$

$$t_i \geq P_{d_i}^{ref} - P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}. \quad (6.84)$$

$$W_1 = V_s^2, \quad (6.85)$$

$$\tilde{W}_1 = V_s^2, \quad (6.86)$$

$$W_i \geq \underline{V}_i^2, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (6.87)$$

$$\tilde{W}_i \geq \underline{V}_i^2, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (6.88)$$

$$U_i = \sum_{j \in \mathcal{B}} A_{j,i} W_j, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.89)$$

$$\tilde{U}_i = \sum_{j \in \mathcal{B}} A_{j,i} \tilde{W}_j, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.90)$$

$$-b_i^{(k-1)} \bar{S}_i \leq P_i \leq b_i^{(k-1)} \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.91)$$

$$-b_i^{(k-1)} \bar{S}_i \leq \tilde{P}_i \leq b_i^{(k-1)} \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.92)$$

$$-b_i^{(k-1)} \bar{S}_i \leq Q_i \leq b_i^{(k-1)} \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.93)$$

$$-b_i^{(k-1)} \bar{S}_i \leq \tilde{Q}_i \leq b_i^{(k-1)} \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.94)$$

$$-b_i^{(k-1)} \bar{S}_i \sqrt{2} \leq P_i + Q_i \leq b_i^{(k-1)} \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.95)$$

$$-b_i^{(k-1)} \bar{S}_i \sqrt{2} \leq P_i - Q_i \leq b_i^{(k-1)} \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.96)$$

$$-b_i^{(k-1)} \bar{S}_i \sqrt{2} \leq \tilde{P}_i + \tilde{Q}_i \leq b_i^{(k-1)} \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.97)$$

$$-b_i^{(k-1)} \bar{S}_i \sqrt{2} \leq \tilde{P}_i - \tilde{Q}_i \leq b_i^{(k-1)} \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.98)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j = -(P_{d_i} - P_{e_i}), \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.99)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} Q_j = -Q_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.100)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} \tilde{P}_j = -\lambda P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.101)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} \tilde{Q}_j = -Q_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.102)$$

$$b_i^{(k-1)} U_i = 2(P_i R_i + Q_i X_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.103)$$

$$b_i^{(k-1)} \tilde{U}_i = 2(P_i R_i + Q_i X_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.104)$$

$$P_s = \sum_{i \in \mathcal{T}} P_i, \quad (6.105)$$

$$\tilde{P}_s = \sum_{i \in \mathcal{T}} \tilde{P}_i, \quad (6.106)$$

$$P_s = \sum_{i \in \mathcal{D}} k_{d_i}, \quad (6.107)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{E}} P_{e_i} = \sum_{i \in \mathcal{S}} P_{e_{L_i}}, \quad (6.108)$$

$$0 \leq P_{e_{L_i}} \leq \frac{1}{l} \sum_{j \in \mathcal{E}} \bar{P}_{e_j}, \quad i \in \mathcal{S}, \quad (6.109)$$

$$z_i^{(k-1)} \underline{P}_{e_i} \leq P_{e_i} \leq z_i^{(k-1)} \bar{P}_{e_i}, \quad i \in \mathcal{E}, \quad (6.110)$$

$$0 \cdot P_{d_i} \leq k_{d_i} \leq 1 \cdot P_{d_i}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.111)$$

каде  $P_{d_i}$ ,  $Q_{d_i}$  и  $P_{e_i}$  се дефинирани како променливи со соодветни ограничувања, а  $b_i$  и  $z_i$  се дефинирани како константи чии вредности се добиваат со решавање на главниот проблем од претходната итерација ( $k-1$ ). За вредностите на  $b_i^{(0)}$  и  $z_i^{(0)}$  во првата итерација се користат податоците добиени со решавање на ОКРДМ-ОЛДБС проблем при детерминистички моделирана потрошувачка.

Со изразите од (6.80) до (6.111) се дефинирани примарните ограничувања за задоволување на ККТ условите.

Прв извод од Лагранжовата функција, во однос на сите примарни променливи, се дадени со изразите:

$$2L_i P_i + 2R_i \Delta_i - M_i^{\min} + M_i^{\max} - \theta_i^{\min} + \theta_i^{\max} - \theta 1_i^{\min} + \theta 1_i^{\max} - \sum_{j \in \mathcal{D}} \rho_j A_{j,i} + \pi, \quad i \in \mathcal{T}, \quad (6.112)$$

$$2L_i P_i + 2R_i \Delta_i - M_i^{\min} + M_i^{\max} - \theta_i^{\min} + \theta_i^{\max} - \theta 1_i^{\min} + \theta 1_i^{\max} - \sum_{j \in \mathcal{D}} \rho_j A_{j,i}, \quad i \in \mathcal{L}/i \in \mathcal{T}, \quad (6.113)$$

$$2L_i Q_i + 2X_i \Delta_i - \mu_i^{\min} + \mu_i^{\max} - \theta_i^{\min} + \theta_i^{\max} + \theta 1_i^{\min} - \theta 1_i^{\max} - \sum_{j \in \mathcal{D}} \tau_j A_{j,i}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.114)$$

$$C_{EP} + \rho_i - \tilde{\varphi}_i^{\min} + \tilde{\varphi}_i^{\max} - \nu 1 = 0, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.115)$$

$$C_{EE} \beta(l)_i + \nu 1 - \vartheta_i^{\min} + \vartheta_i^{\max} = 0, \quad i \in \mathcal{S}, \quad (6.116)$$

$$-\alpha 1 - \alpha_i + \sum_{j \in \mathcal{L}} \gamma_j A_{i,j} = 0, \quad i = 1, \quad (6.117)$$

$$-\alpha 1 + \sum_{j \in \mathcal{L}} \gamma_j A_{i,j} = 0, \quad i \in \mathcal{B}/i = 1, \quad (6.118)$$

$$-\tilde{\alpha} 1 - \tilde{\alpha}_i + \sum_{j \in \mathcal{L}} \tilde{\gamma}_j A_{i,j} = 0, \quad i = 1, \quad (6.119)$$

$$-\tilde{\alpha} 1 + \sum_{j \in \mathcal{L}} \tilde{\gamma}_j A_{i,j} = 0, \quad i \in \mathcal{B}/i = 1, \quad (6.120)$$

$$-\gamma_i + \Delta_i b_i^{(v-1)} = 0, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.121)$$

$$-\tilde{\gamma}_i + \tilde{\Delta}_i b_i^{(v-1)} = 0, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.122)$$

$$2R_i \tilde{\Delta}_i - \tilde{M}_i^{\min} + \tilde{M}_i^{\max} - \tilde{\theta}_i^{\min} + \tilde{\theta}_i^{\max} - \tilde{\theta} 1_i^{\min} + \tilde{\theta} 1_i^{\max} - \sum_{j \in \mathcal{D}} \tilde{\rho}_j A_{j,i} + \tilde{\pi}, \quad i \in \mathcal{T}, \quad (6.123)$$

$$2R_i \tilde{\Delta}_i - \tilde{M}_i^{\min} + \tilde{M}_i^{\max} - \tilde{\theta}_i^{\min} + \tilde{\theta}_i^{\max} - \tilde{\theta} 1_i^{\min} + \tilde{\theta} 1_i^{\max} - \sum_{j \in \mathcal{D}} \tilde{\rho}_j A_{j,i}, \quad i \in \mathcal{L}/i \in \mathcal{T}, \quad (6.124)$$

$$2X_i \tilde{\Delta}_i - \tilde{\mu}_i^{\min} + \tilde{\mu}_i^{\max} - \tilde{\theta}_i^{\min} + \tilde{\theta}_i^{\max} + \tilde{\theta} 1_i^{\min} - \tilde{\theta} 1_i^{\max} - \sum_{j \in \mathcal{D}} \tilde{\tau}_j A_{j,i}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.125)$$

$$-\tilde{\rho}_i - \tilde{\rho}_i^{\min} + \tilde{\rho}_i^{\max} + \nu = 0, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.126)$$

$$-\pi - \nu = 0. \quad (6.127)$$

Понатаму, во потпроблемот се вклучуваат ограничувањата за комплементарна опуштеноост, преку примена на следните изрази:

$$\alpha_i \geq 0,$$

$$(W_i - \underline{V}_i^2) \geq 0,$$

$$\alpha_i (W_i - \underline{V}_i^2) = 0, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (6.128)$$

$$\tilde{\alpha}_i \geq 0,$$

$$\begin{aligned} (\tilde{W}_i - \underline{V}_i^2) &\geq 0, \\ \tilde{\alpha}_i(\tilde{W}_i - \underline{V}_i^2) &= 0, \quad i \in \mathcal{B}, \end{aligned} \quad (6.129)$$

$$\begin{aligned} M_i^{min} &\geq 0, \\ (P_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i) &\geq 0, \\ M_i^{min}(P_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i) &= 0, \quad i \in \mathcal{L}, \end{aligned} \quad (6.130)$$

$$\begin{aligned} M_i^{max} &\geq 0, \\ (b_i^{(k-1)}\bar{S}_i - P_i) &\geq 0, \\ M_i^{max}(b_i^{(k-1)}\bar{S}_i - P_i) &= 0, \quad i \in \mathcal{L}, \end{aligned} \quad (6.131)$$

$$\begin{aligned} \tilde{M}_i^{min} &\geq 0, \\ (\tilde{P}_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i) &\geq 0, \\ \tilde{M}_i^{min}(\tilde{P}_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i) &= 0, \quad i \in \mathcal{L}, \end{aligned} \quad (6.132)$$

$$\begin{aligned} \tilde{M}_i^{max} &\geq 0, \\ (b_i^{(k-1)}\bar{S}_i - \tilde{P}_i) &\geq 0, \\ \tilde{M}_i^{max}(b_i^{(k-1)}\bar{S}_i - \tilde{P}_i) &= 0, \quad i \in \mathcal{L}, \end{aligned} \quad (6.133)$$

$$\begin{aligned} \mu_i^{min} &\geq 0, \\ (Q_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i) &\geq 0, \\ \mu_i^{min}(Q_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i) &= 0, \quad i \in \mathcal{L}, \end{aligned} \quad (6.134)$$

$$\begin{aligned} \mu_i^{max} &\geq 0, \\ (b_i^{(k-1)}\bar{S}_i - Q_i) &\geq 0, \\ \mu_i^{max}(b_i^{(k-1)}\bar{S}_i - Q_i) &= 0, \quad i \in \mathcal{L}, \end{aligned} \quad (6.135)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}_i^{min} &\geq 0, \\ (\tilde{Q}_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i) &\geq 0, \\ \tilde{\mu}_i^{min}(\tilde{Q}_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i) &= 0, \quad i \in \mathcal{L}, \end{aligned} \quad (6.136)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}_i^{max} &\geq 0, \\ (b_i^{(k-1)}\bar{S}_i - \tilde{Q}_i) &\geq 0, \\ \tilde{\mu}_i^{max}(b_i^{(k-1)}\bar{S}_i - \tilde{Q}_i) &= 0, \quad i \in \mathcal{L}, \end{aligned} \quad (6.137)$$

$$\begin{aligned} \theta_i^{min} &\geq 0, \\ (P_i + Q_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2}) &\geq 0, \\ \theta_i^{min}(P_i + Q_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2}) &= 0, \quad i \in \mathcal{L}, \end{aligned} \quad (6.138)$$

$$\begin{aligned}
\theta_i^{max} &\geq 0, \\
(b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2} - P_i - Q_i) &\geq 0, \\
\theta_i^{max}(b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2} - P_i - Q_i) &= 0, \quad i \in \mathcal{L},
\end{aligned} \tag{6.139}$$

$$\begin{aligned}
\theta 1_i^{min} &\geq 0, \\
(P_i - Q_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2}) &\geq 0, \\
\theta 1_i^{min}(P_i - Q_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2}) &= 0, \quad i \in \mathcal{L},
\end{aligned} \tag{6.140}$$

$$\begin{aligned}
\theta 1_i^{max} &\geq 0, \\
(b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2} - P_i + Q_i) &\geq 0, \\
\theta 1_i^{max}(b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2} - P_i + Q_i) &= 0, \quad i \in \mathcal{L},
\end{aligned} \tag{6.141}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{\theta}_i^{min} &\geq 0, \\
(\tilde{P}_i + \tilde{Q}_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2}) &\geq 0, \\
\tilde{\theta}_i^{min}(\tilde{P}_i + \tilde{Q}_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2}) &= 0, \quad i \in \mathcal{L},
\end{aligned} \tag{6.142}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{\theta}_i^{max} &\geq 0, \\
(b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2} - \tilde{P}_i - \tilde{Q}_i) &\geq 0, \\
\tilde{\theta}_i^{max}(b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2} - \tilde{P}_i - \tilde{Q}_i) &= 0, \quad i \in \mathcal{L},
\end{aligned} \tag{6.143}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{\theta} 1_i^{min} &\geq 0, \\
(\tilde{P}_i - \tilde{Q}_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2}) &\geq 0, \\
\tilde{\theta} 1_i^{min}(\tilde{P}_i - \tilde{Q}_i + b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2}) &= 0, \quad i \in \mathcal{L},
\end{aligned} \tag{6.144}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{\theta} 1_i^{max} &\geq 0, \\
(b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2} - \tilde{P}_i + \tilde{Q}_i) &\geq 0, \\
\tilde{\theta} 1_i^{max}(b_i^{(k-1)}\bar{S}_i\sqrt{2} - \tilde{P}_i + \tilde{Q}_i) &= 0, \quad i \in \mathcal{L},
\end{aligned} \tag{6.145}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{\rho}^{min} &\geq 0, \\
k_{d_i} &\geq 0, \\
\tilde{\rho}^{min}k_{d_i} &= 0, \quad i \in \mathcal{D},
\end{aligned} \tag{6.146}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{\rho}^{max} &\geq 0, \\
(P_{d_i} - k_{d_i}) &\geq 0, \\
\tilde{\rho}^{max}(P_{d_i} - k_{d_i}) &= 0, \quad i \in \mathcal{D},
\end{aligned} \tag{6.147}$$

$$\begin{aligned}
\varphi_i^{min} &\geq 0, \\
P_{eL_i} &\geq 0, \\
\varphi_i^{min}P_{eL_i} &= 0, \quad i \in \mathcal{S},
\end{aligned} \tag{6.148}$$

$$\begin{aligned} \varphi_i^{max} &\geq 0, \\ \left( \frac{1}{l} \sum_i \bar{P}_{e_i} - P_{e_{L_i}} \right) &\geq 0, \\ \varphi_i^{max} \left( \frac{1}{l} \sum_i \bar{P}_{e_i} - P_{e_{L_i}} \right) &= 0, \quad i \in \mathcal{S}, \end{aligned} \quad (6.149)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_i^{min} &\geq 0, \\ \left( P_{e_i} - z_i^{(k-1)} \underline{P}_{e_i} \right) &\geq 0, \\ \tilde{\varphi}_i^{min} \left( P_{e_i} - z_i^{(k-1)} \underline{P}_{e_i} \right) &= 0, \quad i \in \mathcal{E}, \end{aligned} \quad (6.150)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_i^{max} &\geq 0, \\ \left( z_i^{(k-1)} \bar{P}_{e_i} - P_{e_i} \right) &\geq 0, \\ \tilde{\varphi}_i^{max} \left( z_i^{(k-1)} \bar{P}_{e_i} - P_{e_i} \right) &= 0, \quad i \in \mathcal{E}, \end{aligned} \quad (6.151)$$

Со вклучување на примарните ограничувања, равенствата кои се однесуваат на првиот извод од Лагранжовата функција, како и изразите кои се однесуваат на комплементарна опуштеност, во целост е дефиниран потпроблемот за ОКРДМ-ОЛДБС во услови на несигурна потрошувачка.

#### 6.4.2 Дефинирање на главниот проблем за ОКРДМ-ОЛДБС

Како што е дефинирано во потпоглавје 2.3.2, при решавање на итеративниот ДПО алгоритам, во секоја итерација бројот на ограничувања и променливи се зголемува. Во главниот проблем, активната моќност на потрошувачките јазли  $P_{d_i}$ , реактивната моќност на потрошувачките јазли  $Q_{d_i}$  и активната моќност на СБС  $P_{e_i}$ , се дефинирани како константи со позната вредност. Вредностите за овие константи се добиени со решавање на потпроблемот од тековната итерација, дефиниран во потпоглавје 6.4.1.

Функцијата на цел на главниот проблем е дадена со изразот:

$$\min_{b,z} \sum_{i \in \mathcal{L}} b_i C_i + \sum_{i \in \mathcal{E}} C_{ESS} z_i + \eta. \quad (6.152)$$

Со ограничувања:

$$\eta \geq \sum_{i \in \mathcal{L}} L_i \left( P_i^{(k)2} + Q_i^{(k)2} \right) + \sum_{i \in \mathcal{E}} C_{EP} P_{e_i}^{(k)} + C_{EE} \sum_{i \in \mathcal{S}} \beta^{(k)}(1)_i P_{e_{L_i}}^{(k)}, \quad (6.153)$$

$$b_i \in \{0,1\}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.154)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{L}} b_i = n_b - 1, \quad (6.155)$$

$$z_i \in \{0,1\}, \quad i \in \mathcal{E}, \quad (6.156)$$

$$W_1^{(k)} = V_s^2, \quad (6.157)$$

$$\tilde{W}_1^{(k)} = V_s^2, \quad (6.158)$$



$$W_i^{(k)} \geq \underline{V}_i^2, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (6.159)$$

$$\tilde{W}_i^{(k)} \geq \underline{V}_i^2, \quad i \in \mathcal{B}, \quad (6.160)$$

$$U_i^{(k)} = \sum_{j \in \mathcal{B}} A_{j,i} W_j^{(k)}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.161)$$

$$\tilde{U}_i^{(k)} = \sum_{j \in \mathcal{B}} A_{j,i} \tilde{W}_j^{(k)}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.162)$$

$$-b_i \bar{S}_i \leq P_i^{(k)} \leq b_i \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.163)$$

$$-b_i \bar{S}_i \leq \tilde{P}_i^{(k)} \leq b_i \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.164)$$

$$-b_i \bar{S}_i \leq Q_i^{(k)} \leq b_i \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.165)$$

$$-b_i \bar{S}_i \leq \tilde{Q}_i^{(k)} \leq b_i \bar{S}_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.166)$$

$$-b_i \bar{S}_i \sqrt{2} \leq P_i^{(k)} + Q_i^{(k)} \leq b_i \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.167)$$

$$-b_i \bar{S}_i \sqrt{2} \leq P_i^{(k)} - Q_i^{(k)} \leq b_i \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.168)$$

$$-b_i \bar{S}_i \sqrt{2} \leq \tilde{P}_i^{(k)} + \tilde{Q}_i^{(k)} \leq b_i \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.169)$$

$$-b_i \bar{S}_i \sqrt{2} \leq \tilde{P}_i^{(k)} - \tilde{Q}_i^{(k)} \leq b_i \bar{S}_i \sqrt{2}, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.170)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} P_j^{(k)} = -(P_{d_i}^{(k)} - P_{e_i}^{(k)}), \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.171)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} Q_j^{(k)} = -Q_{d_i}^{(k)}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.172)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} \tilde{P}_j^{(k)} = -\lambda^{(k)} P_{d_i}^{(k)}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.173)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} A_{i,j} \tilde{Q}_j^{(k)} = -Q_{d_i}^{(k)}, \quad i \in \mathcal{D}, \quad (6.174)$$

$$F_i^{(k)} = 2(P_i^{(k)} R_i + Q_i^{(k)} X_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.175)$$

$$\tilde{F}_i^{(k)} = 2(P_i^{(k)} R_i + Q_i^{(k)} X_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.176)$$

$$-V_n^2 b_i \leq F_i^{(k)} \leq V_n^2 b_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.177)$$

$$-V_n^2 b_i \leq \tilde{F}_i^{(k)} \leq V_n^2 b_i, \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.178)$$

$$U_i^{(k)} - V_n^2(1 - b_i) \leq F_i^{(k)} \leq U_i^{(k)} + V_n^2(1 - b_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.179)$$

$$\tilde{U}_i^{(k)} - V_n^2(1 - b_i) \leq \tilde{F}_i^{(k)} \leq \tilde{U}_i^{(k)} + V_n^2(1 - b_i), \quad i \in \mathcal{L}, \quad (6.180)$$

$$P_s^{(k)} = \sum_{i \in \mathcal{T}} P_i^{(k)}, \quad (6.181)$$

$$\tilde{P}_s^{(k)} = \sum_{i \in \mathcal{T}} \tilde{P}_i^{(k)}, \quad (6.182)$$

$$P_s^{(k)} = \sum_{i \in \mathcal{D}} \lambda^{(k)} P_{d_i}^{(k)}, \quad (6.183)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{E}} P_{e_i}^{(k)} = \sum_{i \in \mathcal{S}} P_{e_{L_i}}^{(k)}, \quad (6.184)$$

$$0 \leq P_{e_{L_i}}^{(k)} \leq \frac{1}{l} \sum_{j \in \mathcal{E}} \bar{P}_{e_j}, \quad i \in \mathcal{S}, \quad (6.185)$$

$$z_i \underline{P}_{e_i} \leq P_{e_i}^{(k)} \leq z_i \bar{P}_{e_i}, \quad i \in \mathcal{E}, \quad (6.186)$$

каде  $k = 1, 2, \dots$  претставува бројач за тековната итерација.

Со решавањето на главниот проблем во тековната итерација, ДГВ се добива со одредување на вредноста на функцијата на цел дефинирана со изразот (6.152). Односно, за ДГВ можеме да запишеме:

$$\text{ДГВ}_k = \sum_{i \in \mathcal{L}} C_i b_i^{(k)} + \eta^{(k)}. \quad (6.187)$$

каде со  $k$ , во овој случај, е означена вредноста од последната итерација.

На слика 5.3, од потпоглавје 5.4.2, е прикажан дијаграмот за примена на ДПО алгоритмот за решавање на ОКРДМ. Бидејќи развиениот оптимизациски метод за решавање на проблемот за ОКРДМ-ОЛДБС претставува надоградба на ОКРДМ, истиот дијаграм од слика 5.3 може да се употреби за приказ на развиената итеративната оптимизациска метода.

Со изразот (6.188) е дефиниран услов за прекин на итеративниот процес:

$$\text{ГГВ}_k - \text{ДГВ}_k \leq \epsilon, \quad (6.188)$$

каде  $\epsilon$  е прифатливата грешка во разликата помеѓу ГГВ добиена со решавање на потпроблемот и ДГВ добиена со решавање на главниот проблем, а  $k$  е индексот од тековната итерација за која се постигнало задоволување на условот (6.188). Вредностите за системските променливи  $b_i^{(k)}$ ,  $z_i^{(k)}$  и  $\text{ДГВ}_k$  добиени со решавање на главниот проблем во последната итерација, ја одредуваат конечната топологија на СДМ, конечната локација за поставување на СБС и вредноста на функцијата на цел од анализираниот проблем.

## 7 РЕЗУЛТАТИ – АПЛИКАТИВЕН ДЕЛ

Изработените оптимизациски методи во оваа докторска дисертација се користат за среднорочно и/или долгорочно оптимално планирање на радијални ДМ, во услови на несигурна потрошувачка. Во општ случај, методите може да се користат за планирање на нисконапонски или среднонапонски ДМ. Во ова поглавје ќе бидат анализирани резултатите од две карактеристични сценарија:

- примена на оптимизациски метод за ОСПВ презентирани во поглавје 4, за среднорочно планирање на СДМ со 24 потрошувачки јазли прикажана на слика 4.1,
- примена на оптимизациските методи за ОКРДМ и ОКРДМ-ОЛДБС презентирани во поглавје 5 и 6, за долгорочно планирање на СДМ со 24 потрошувачки јазли прикажана на слика 5.1.

За соодветно да се реши проблемот за ОСПВ и ОКРДМ, потребно е да се одреди интервалот на несигурна потрошувачка. Во овој случај, ќе анализираме сценарио во кое на 24-те потрошувачки јазли од СДМ се приклучени НДМ кои напојуваат потрошувачи од типот домаќинство. Целта е да се земе предвид несигурната потрошувачка на целокупната НДМ, поради приклучување на ЕВ и ФП во истата. За таа цел, ќе го употребиме стохастичкиот модел за одредување на границите на интервалот на несигурност презентирани во поглавје 3. Добиените вредности од стохастичкиот модел за 24-те НДМ ќе бидат употребени при решавање на трите оптимизациски методи. Во табела 7.1 се прикажани вредностите кои се добиени со примена на стохастичкиот модел за одредување на интервалот на несигурност. Резултатите се добиени со решавање на 10,000 МК итерации.

Првата колона од табелата 7.1 го дефинира јазолот од СДМ. Втората колона се однесува на бројот на домаќинства кои се приклучени на НДМ. Бидејќи идејата е да се добие непредвидливост во влезните податоци, бројот на домаќинства приклучени во секоја од 24-те НДМ постепено се намалува. Сепак, топологијата на НДМ ја задржува конфигурацијата на мрежата прикажана на слика 3.6. Намалувањето на бројот на домаќинствата се постигнува со постепено исклучување на оние домаќинства кои се наоѓаат најдалеку од напојната трафостаница СН/НН.

Третата и четвртата колона од табелата се однесуваат на нивото на пенетрација на ЕВ и ФП во НДМ, изразени во проценти. Со примена на изразите (3.7) и (3.12), за веќе дефинирано ниво на пенетрација се одредува вкупниот број на ЕВ и ФП кои се приклучени во НДМ. Во секоја МК итерација, произволно се одбираат домаќинствата кои поседуваат ЕВ и/или ФП. Во анализата се земени предвид три карактеристични сценарија за ниво на пенетрација на ЕВ и ФП:

- $N_p = 30\%$  и  $N_{PV} = 10\%$ ,
- $N_p = 50\%$  и  $N_{PV} = 30\%$ ,
- $N_p = 70\%$  и  $N_{PV} = 50\%$ .

Во петтата и шестата колона од табелата се прикажани вредности од интервалот на несигурност. Вредностите се добиени со примена на стохастичкиот модел и ги претставуваат минималната и максималната ангажирана врвна моќност во секоја од 24-те НДМ. Бидејќи врвната ангажирана моќност (како и бројот на ЕВ и ФП) е пропорционален на бројот на домаќинства во НДМ, со намалување на бројот на

домаќинства во НДМ во пооддалечените среднонапонски јазли, се добива намалена вредност за минималната и максималната врвна моќност.

Табела 7.1 Резултати добиени со примена на стохастичкиот модел

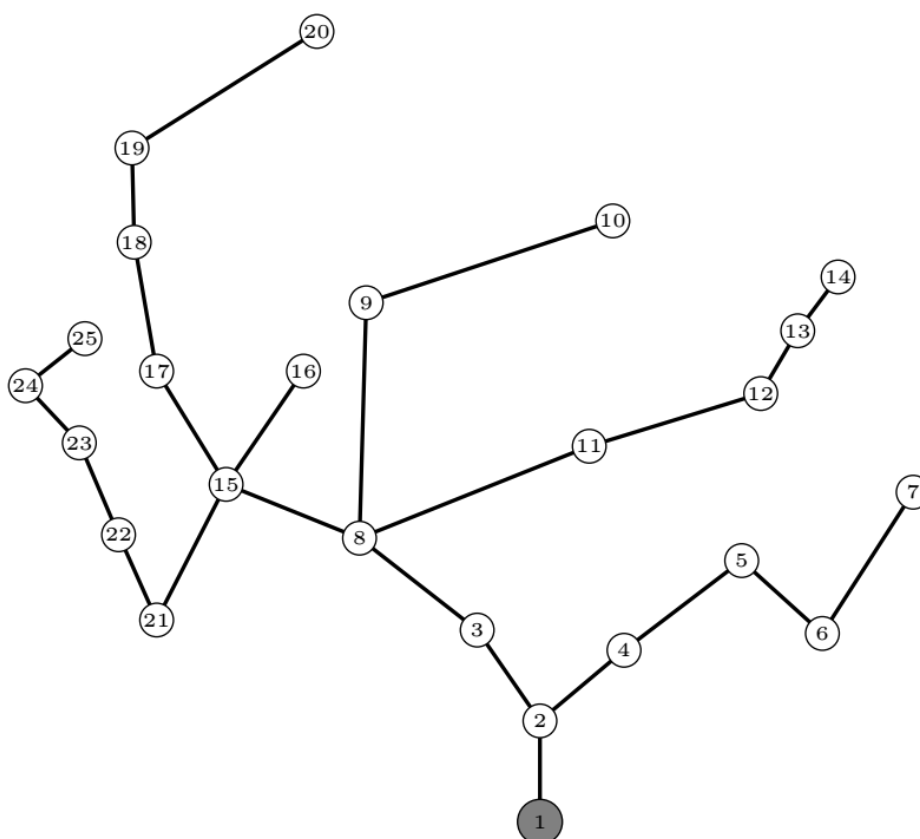
Јазол [#]	$N_{HH}$ [#]	$N_p$ [%]	$N_{PV}$ [%]	$\underline{P}_d$ [kW]	$\overline{P}_d$ [kW]	$P_d^{ref}$ [kW]	$P_d^A$ [kW]
1	55	30	10	239.43	367.79	303.61	64.18
2	55	50	30	238.72	374.65	306.69	67.97
3	55	70	50	248.21	388.22	318.22	70.01
4	47	30	10	208.54	327.85	268.20	59.66
5	47	50	30	212.71	338.79	275.75	63.04
6	47	70	50	216.66	356.69	286.68	70.02
7	39	30	10	168.93	273.73	221.33	52.40
8	39	50	30	177.75	285.20	231.48	53.73
9	39	70	50	181.32	301.29	241.31	59.99
10	31	30	10	141.35	233.35	187.35	46.00
11	31	50	30	150.30	248.11	199.21	48.91
12	31	70	50	155.87	270.56	213.22	57.35
13	23	30	10	105.49	182.21	143.85	38.36
14	23	50	30	110.53	201.82	156.18	45.65
15	23	70	50	114.29	211.29	162.79	48.50
16	15	30	10	51.90	117.25	84.58	32.68
17	15	50	30	55.13	125.37	90.25	35.12
18	15	70	50	73.91	131.26	102.59	28.68
19	7	30	10	14.81	84.98	49.90	35.09
20	7	50	30	24.40	86.26	55.33	30.93
21	7	70	50	22.77	89.24	56.00	33.24
22	7	30	10	14.81	84.98	49.90	35.09
23	7	50	30	24.40	86.26	55.33	30.93
24	7	70	50	22.77	89.24	56.00	33.24

Во колона седум и осум од табелата се прикажани референтните вредности за врвното оптоварување, како и нејзиното отстапување. Согласно изразите (4.16), (4.17), (5.32) и (5.33) референтната вредност на врвната моќност, како и нејзиното отстапување, се основните податоци потребни за одредување на граничните вредности од интервалот на несигурност. За решавање на проблемот за ОСПВ, ОКРДМ и ОКРДМ-ОЛДБС се употребени податоците од овие две колони. Проблемот за ОСПВ ќе биде анализиран во две карактеристични сценарија: со примена на два и примена на девет типови на водови со различен пресек, чии податоци се дадени во табела 4.1. ОКРДМ и ОКРДМ-ОЛДБС ќе бидат анализирани во услови на новопроектирана СДМ, а

дополнително, ОКРДМ ќе биде употребен за анализирање на резултатите добиени од проширување на постојна СДМ.

## 7.1 Решавање на проблемот за ОСПВ во услови на несигурна потрошувачка

На сликата 7.1 е прикажана топологијата на анализираната СДМ. Мрежата има 24 потрошувачки јазли на кои има приклучено 24 НДМ преку соодветен трансформатор среден на низок напон. Целта на оптимизациската постапка е за секоја гранка од СДМ да се одбере вод со оптимален пресек, согласно податоците во табелата 4.1. Врвната ангажирана моќност во секој од 24-те јазли се дефинира со соодветен интервал на несигурност согласно податоците презентирани во табела 7.1.



Слика 7.1 Топологија на радијална СДМ

Во функцијата на цел со кој се опишува проблемот за ОСПВ влегуваат капиталните инвестициски трошоци за набавка и изведба на водовите, како и трошоците поради технички загуби на активна енергија во мрежата. Функцијата на цел се пресметува за период од една година, каде капиталните трошоци се претставени преку соодветен фактор на актуализација.

Покрај податоците презентирани во табела 7.1, во пресметките се употребени и следните влезни податоци:

- напонот на напојниот јазол  $V_1 = 10 \text{ kV}$ ,
- минимално дозволен напон во мрежата  $\underline{V} = 9.5 \text{ kV}$ ,
- фактор на актуализација  $g = 0.1$ ,
- цена на електрична енергија  $c_l = 0.1 \text{ \$/kWh}$ ,
- фактор на оптоварување  $\alpha = 0.6$ ,

- фактор на моќност за сите домаќинства  $\cos\varphi = 0.95$ ,
- должината на водовите е прикажана во табела 7.2.

Табела 7.2 Должина на гранките од СДМ

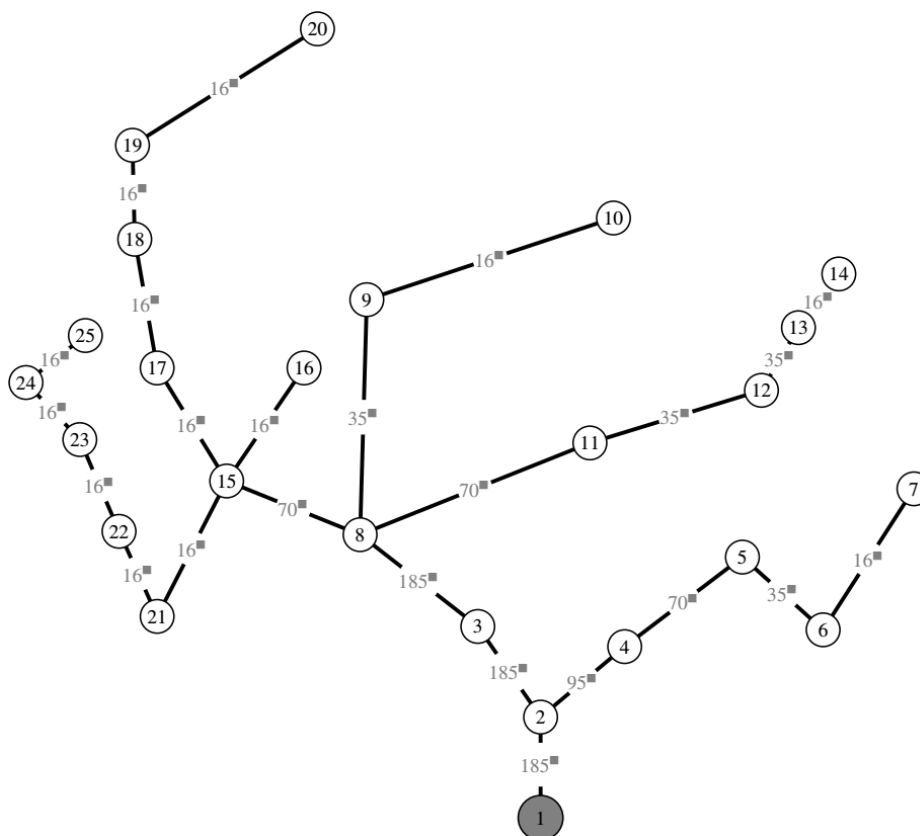
почетен јазол	краен јазол	должина [km]	почетен јазол	краен јазол	должина [km]
TR	1	1.20	12	13	0.50
1	2	1.05	7	14	2.20
1	3	0.75	14	15	0.20
3	4	1.00	14	16	1.00
4	5	0.75	16	17	1.05
5	6	1.25	17	18	0.50
2	7	1.65	18	19	1.75
7	8	1.75	14	20	1.55
8	9	2.00	20	21	0.75
7	10	1.75	21	22	0.75
10	11	1.50	22	23	0.50
11	12	0.45	23	24	0.50

Најпрво, ќе го решиме проблемот за ОСПВ со примена на оптимизациски метод со детерминистички моделирана потрошувачка презентирани во потпоглавје 4.3. Вредноста на активната моќност  $P_{d_i}$  во секој од 24-те потрошувачки јазли е еднаква на референтната вредност  $P_{d_i}^{ref}$ , презентирани во табела 7.1. Вкупното оптоварување во мрежата изнесува 4,115.78 kW. Постигнатиот резултат е прикажан на слика 7.2, каде над секоја гранка од мрежата е запишан пресекот на избраниот вод.

Вредноста на функцијата на цел која ги претставува вкупните годишни трошоци изнесува 87,319.00 \$. Од вкупните годишни трошоци, 53,229.00 \$ отпаѓаат на капитални инвестициски трошоци, а 34,090.00 \$ се годишни трошоци поради технички загуби на електрична енергија во мрежата.

Како што беше елаборирано во потпоглавје 4.4 од оваа докторска дисертација, оптимизацискиот метод во услови на несигурна потрошувачка се решава на начин што истиот се дели на потпроблем и главен проблем. Во потпроблемот, активната моќност на потрошувачите  $P_{d_i}$  е дефинирана како променлива ограничена со граничните вредности од интервалот на несигурност (4.18). За гранични вредности на интервалот на несигурност се користат вредностите презентирани во табела 7.1.

Во изразот (4.19), буџетот на несигурност  $\Gamma$  се користи за фина регулација на степенот на варијабилност на несигурната потрошувачка  $P_{d_i}$ . Тој може да биде со вредност од 0 до 1. Кога  $\Gamma = 0$ , во анализата не е вклучена несигурност, а кога  $\Gamma = 1$  се воведува максимална несигурност, со што несигурната променлива  $P_{d_i}$  може да ја добие било која вредност од интервалот на несигурност ограничен со  $\underline{P}_{d_i}$  и  $\overline{P}_{d_i}$ . Во овој пример, ќе ги анализираме двата карактеристични случаи, кога  $\Gamma = 0$  и  $\Gamma = 1$ .



Слика 7.2 Детерминистичко решение од оптимизациски метод за ОСПВ

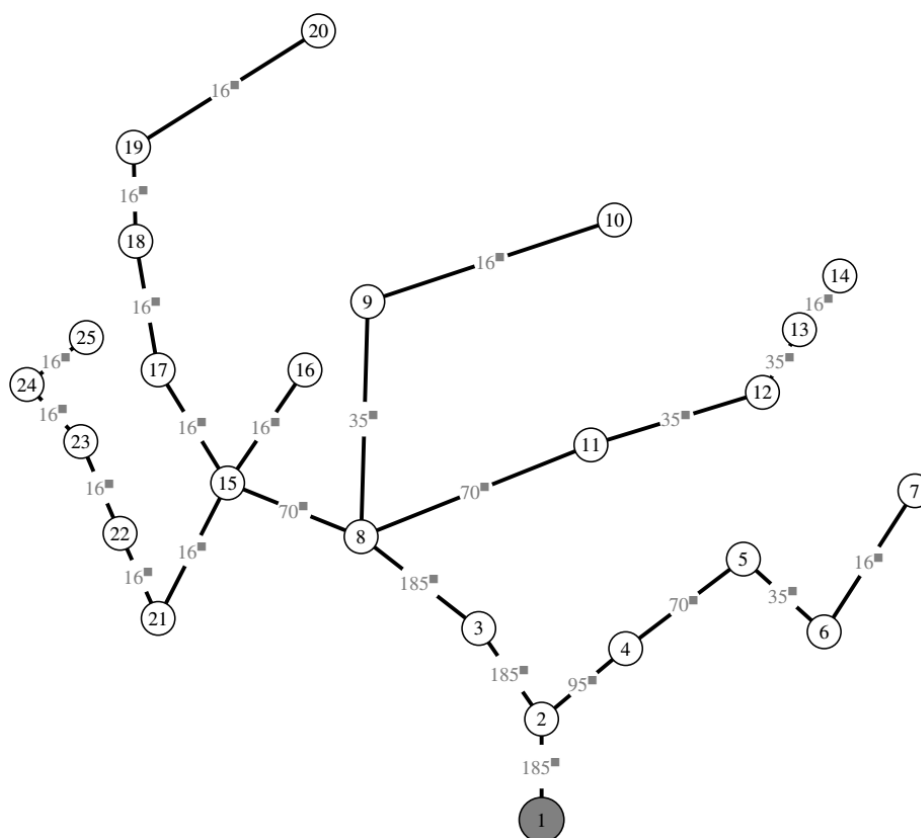
Имајќи го предвид неравенството (4.19), кога  $\Gamma = 0$  важи следниот израз за несигурната променлива  $P_{d_i}$ :

$$P_{d_i} = P_{d_i}^{ref} \quad (7.1)$$

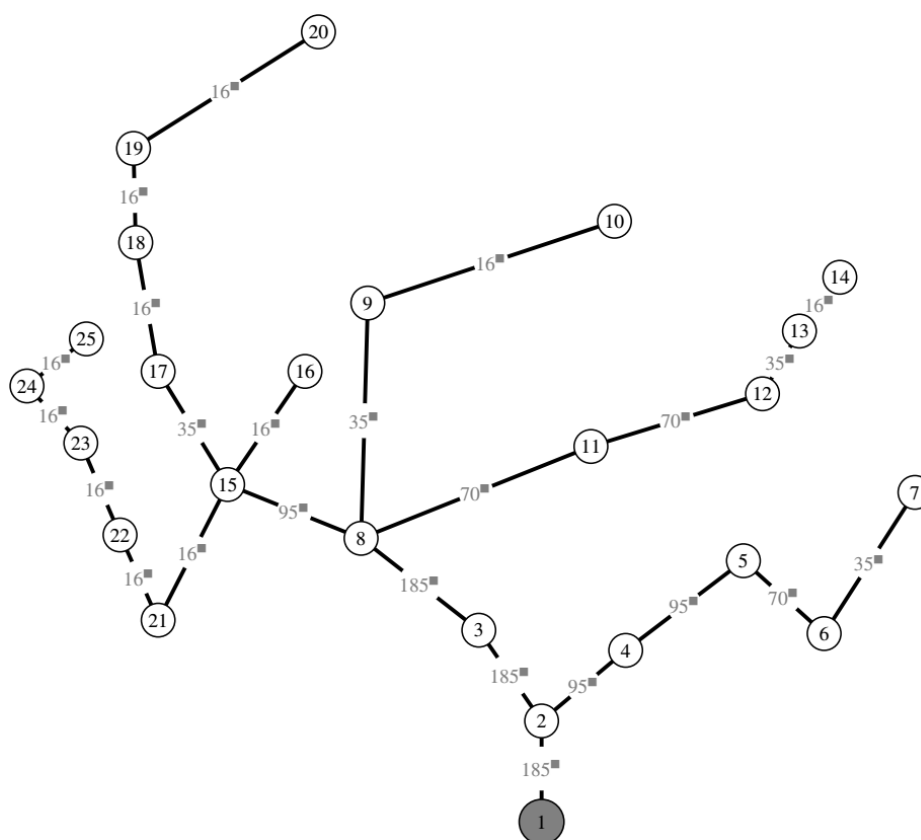
Согласно последниот израз, се разгледува сценарио во кое нема вклучено несигурност во податоците и потрошувачката на активна моќност во јазлите ја изедначуваме со нејзината референтна вредност. На тој начин, го решаваме оптимизацискиот метод со детерминистички вредности за активната моќност  $P_{d_i}$ .

Како што и се очекува, решението добиено кога  $\Gamma = 0$  е исто со решението добиено од детерминистичкиот метод за ОСПВ. Вкупното оптоварување во СДМ е 4,115.78 kW, вредноста на функцијата на цел е 87,319.00 \$, а решението е прикажано на слика 7.3. Робусното решение е добиено после пресметани две итерации и од сликите 7.2 и 7.3 е очигледно дека се добиени истите резултати во споредба со решението добиено при детерминистичко моделирање на потрошувачката. Еднаквоста помеѓу добиените резултати, ја потврдува валидноста на оптимизацискиот метод за ОСПВ во услови на несигурна потрошувачка.

Во случајот кога  $\Gamma = 1$ , согласно изразот (4.19), дозволуваме максимална варијација на несигурната променлива. На тој начин се дозволува  $P_{d_i}$  да ја добие било која вредност од интервалот на несигурност ограничен со  $\underline{P}_{d_i}$  и  $\bar{P}_{d_i}$ . Решението е добиено после четири пресметковни итерации, вклучувајќи ја и нултата итерација добиена од оптимизацискиот метод во услови на детерминистички моделирана потрошувачка. Селекцијата на водовите од секоја итерација е прикажана на сликите од 7.4 до 7.6. Резултатите за  $\Gamma V_k$ ,  $DGV_k$  и вкупното оптоварување во секоја итерација се дадени во табела 7.3.

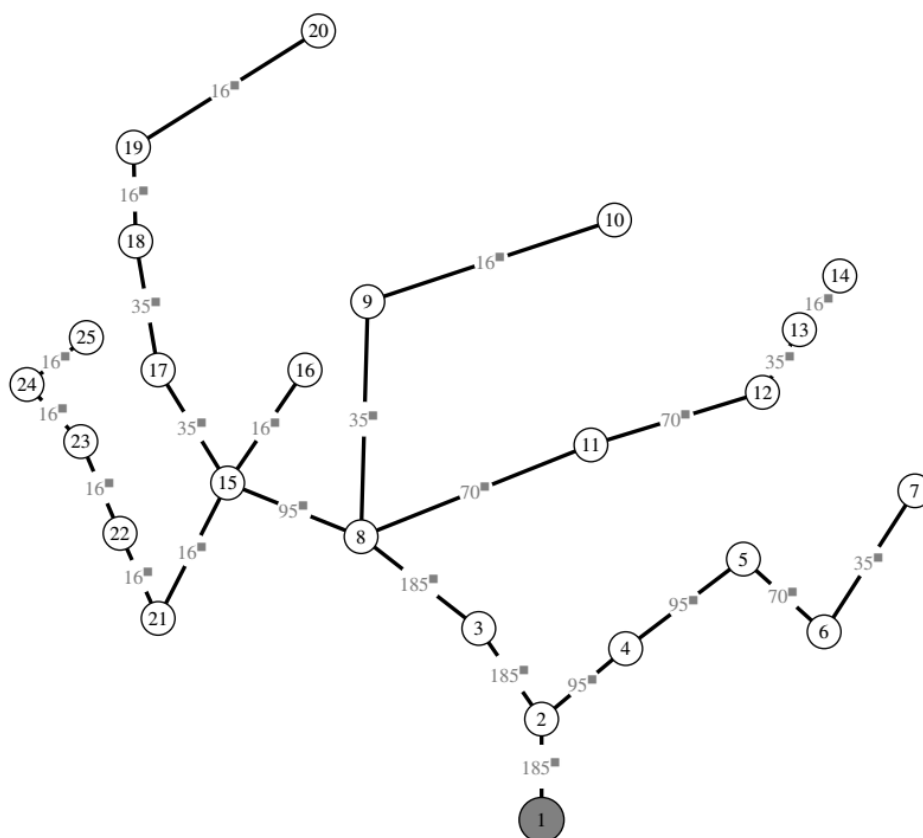


Слика 7.3 Робусно решение од оптимизациски метод за ОСПВ, за  $\Gamma = 0$

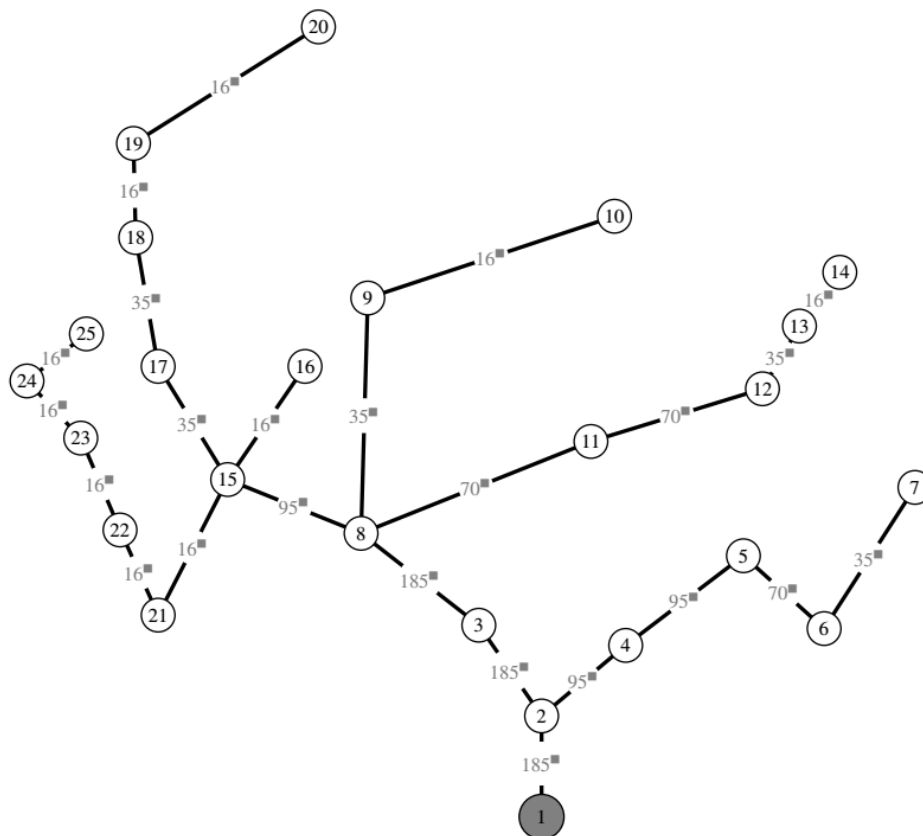


Слика 7.4 Робусно решение од оптимизациски метод за ОСПВ, за  $\Gamma = 1$ , прва итерација





Слика 7.5 Робусно решение од оптимизациски метод за ОСПВ, за  $\Gamma = 1$ , втора итерација



Слика 7.6 Робусно решение од оптимизациски метод за ОСПВ, за  $\Gamma = 1$ , трета итерација

Табела 7.3 Резултати од ОСПВ при несигурна потрошувачка, за  $\Gamma = 1$ 

Итерација	ГГВ <sub>k</sub> [\$]	ДГВ <sub>k</sub> [\$]	$P_d$ [kW]
0	/	87,319.00	4,115.78
1	104,286.64	103,224.61	5,061.86
2	106,160.99	106,150.42	5,154.02
3	106,150.42	106,150.42	5,154.02

Бидејќи бараме максимална вредност од функцијата на цел дефинирана во потпроблемот од ОСПВ во услови на несигурна потрошувачка, со негово решавање ја наоѓаме најнеповолната распределба на несигурната потрошувачка  $P_{d_i}$ . Согласно податоците презентирани во потпоглавје 4.4.1, функцијата на цел во потпроблемот од оптимизацискиот метод се однесува само на трошоците поврзани со годишните загуби на електрична енергија. На тој начин добиваме решение кое е робусно дури и при најнеповолна распределба на несигурната променлива, односно при највисоки трошоци поради загуба на електрична енергија во СДМ.

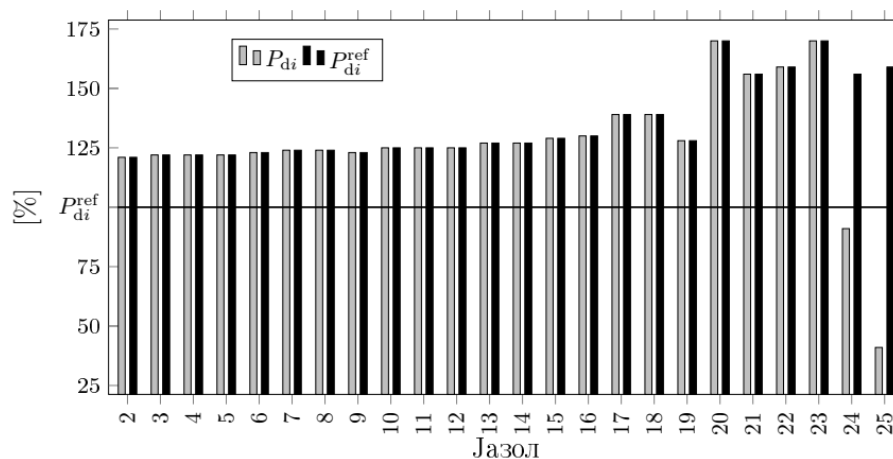
На сликата 7.7 е прикажана распределбата на несигурната променлива добиена како резултат од последната итерација. Истата е изразена во проценти од референтната вредност  $P_{d_i}^{ref}$ . Со црна боја е означена максималната вредност од интервалот на несигурност  $\bar{P}_{d_i}$  за секој од јазлите во мрежата, а со сива боја е означена вредноста на несигурната променлива  $P_{d_i}$  добиена како резултат од примената на оптимизацискиот метод. Согласно податоците на сликата, иако во потпроблемот ја бараме најнеповолната (највисоката) распределба на активна моќност  $P_{d_i}$ , сите јазли од мрежата не ја реализираат максималната гранична вредност од интервалот на несигурност  $\bar{P}_{d_i}$ . Причина за тоа е ограничувањето (4.37) кое се однесува на минимално дозволените напони во мрежата. Бидејќи вредноста на напоните во критичните јазли изнесува:  $V_{22} = 9.5098$  kV,  $V_{23} = 9.5023$  kV и  $V_{24} = 9.500$  kV, активната моќност во јазлите 23 и 24 не ја достигнува максималната гранична вредност. Овој податок може да се толкува како доказ дека со решавањето на потпроблемот се добива најнеповолна можна распределба на несигурната потрошувачка  $P_{d_i}$ , без притоа да се наруши некое друго дефинирано ограничување.

Вредностите добиени за  $P_{d_i}$  се користат за додавање на нови ограничувања во главниот проблем. На тој начин, во секоја итерација, бројот на променливи и ограничувања во главниот проблем со зголемува. Условот за прекин на итеративното решавање е дефиниран со изразот (4.58). Кога овој услов е исполнет, добиеното решение е оптимално, дури и при најнеповолна распределба на несигурната потрошувачка  $P_{d_i}$ .

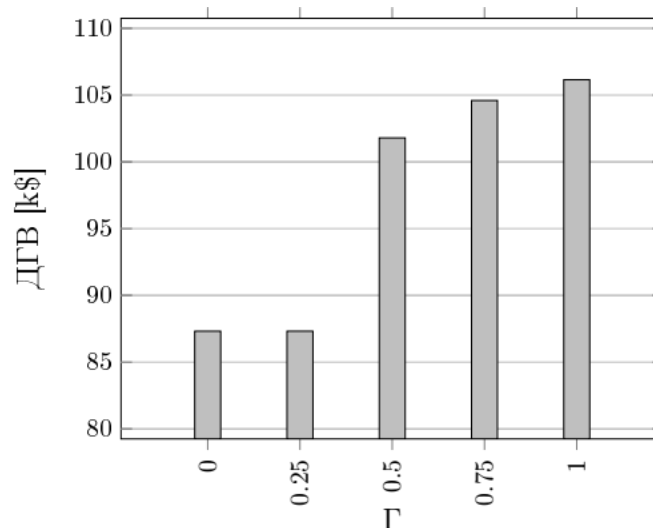
Според податоците прикажани во табела 7.3, највисоката вредност за активната моќност од целокупната СДМ е реализирана во последната итерација и изнесува 5,154.02 kW, при вкупни годишни трошоци од 106,150.42 \$. Споредбено со резултатите добиени со решавање на ОСПВ при детерминистички моделирана потрошувачка, има зголемување од 25 % во вкупната активна моќност за сметка на зголемување од 21 % во вкупните годишни трошоци.

Сепак, овие податоци се однесуваат за вредност на буџетот на несигурност  $\Gamma = 1$ . Како што претходно беше елаборирано, со корекција на  $\Gamma$  постои можност за фина регулација на нивото на несигурност во променливата  $P_{d_i}$ . Односно, за помали

вредности на  $\Gamma$  се дозволува помало зголемување на вкупната активна моќност во СДМ. Секако, важи и обратното, за поголеми вредности на  $\Gamma$  се дозволува поголемо зголемување на вкупната активна моќност во СДМ. Зависноста на вредноста на функцијата на цел од оптимизацискиот метод при несигурна потрошувачка, која ги претставува вкупните годишни трошоци, за различни вредности на параметарот  $\Gamma$ , е прикажана на сликата 7.8.



Слика 7.7 Распределба на  $P_{di}$  од последната итерација



Слика 7.8 Зависност на ДГВ од  $\Gamma$

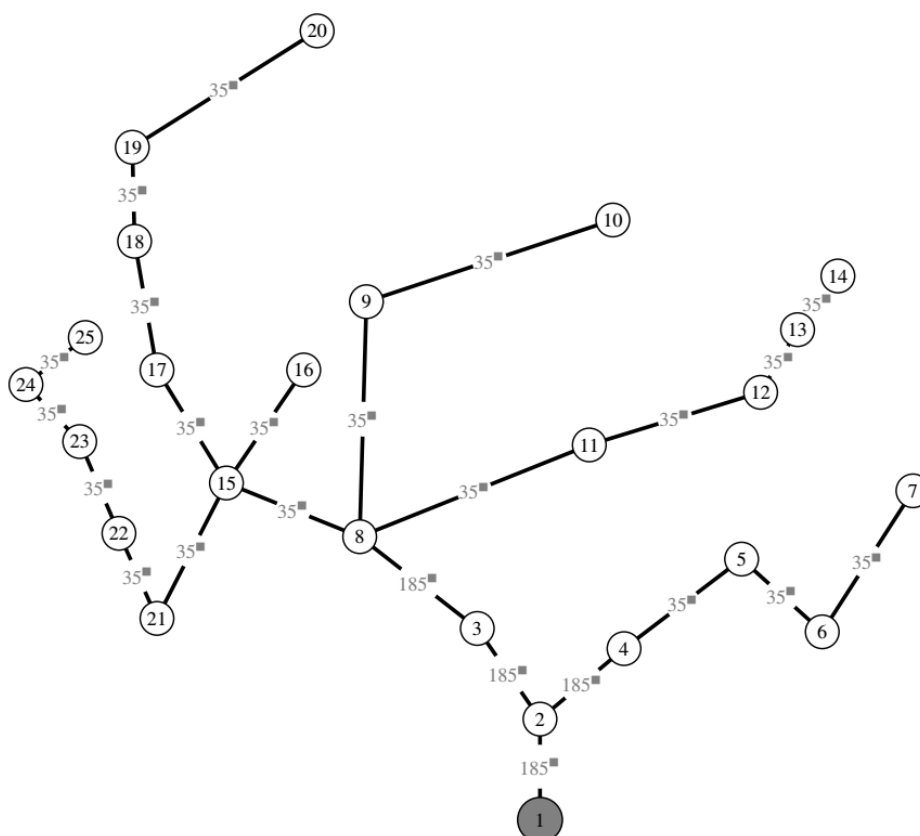
На прв поглед делува дека решението добиено со примена на методот за ОСПВ при несигурна потрошувачка е поскапо во однос на решението добиено со методот за ОСПВ при детерминистички моделирана потрошувачка. Но, решението добиено од оптимизациски метод при несигурна потрошувачка е поевтино гледано од аспект на идните потребни инвестиции во СДМ поради зголемување на активната моќност на потрошувачите. Доколку проектантите на СДМ се одлучат да го применат решението добиено од оптимизациски метод за ОСПВ при несигурна потрошувачка, можат да бидат сигурни дека нема да има нарушување на техничките ограничувања во мрежата дури и при зголемување на вкупниот активен товар до 25%. Бидејќи добиеното решение е робусно и оптимално дури и при најнеповолна распределба на несигурната потрошувачка  $P_{di}$ , случајната распределба на зголемената потрошувачка во мрежата не претставува опасност за нормално функционирање на истата.

Најчесто операторите на ДМ се одлучуваат мрежите од исто напонско ниво да бидат изведени само од два типа на водови со различен пресек. Оправданоста на таквата стратегија е во тоа што на тој начин се стандардизираат ДМ од исто напонско ниво. Притоа, операторот на дистрибутивниот систем постигнува одредено намалување на трошоците за магацинско чување на помал број на водови со различен пресек, како и магацинско чување на потребната дополнителна опрема за поврзување. Бидејќи го намалуваме множеството на водови со различен пресек, очекувано е зголемување на вкупните годишни трошоци за изведба на ДМ. За потврда на горенаведеното, проблемот за ОСПВ ќе биде решен со употреба само на водовите прикажани во табела 7.4.

Табела 7.4 Параметри на водовите

Пресек [ $mm^2$ ]	$r$	$x$	$I_{max}$	Цена
35	0.866	0.126	155	17,200.-
185	0.130	0.096	380	43,500.-

Најпрво, ќе го анализираме решението добиено со примена на методот за ОСПВ при детерминистичко моделирана потрошувачка за СДМ прикажана на слика 7.1. Активната моќност на потрошувачките јазли од СДМ е дефинирана со вредности еднакви на референтната вредност  $P_{d_i}^{ref}$ . Повторно, вкупното оптоварување во мрежата изнесува 4,115.78 kW, а постигнатиот резултат е прикажан на слика 7.9.



Слика 7.9 Детерминистичко решение од оптимизациски метод за ОСПВ, два вода со различен пресек

Вредноста на функцијата на цел, односно вкупните годишни трошоци изнесуваат 94,022.00 \$. Од вкупните годишни трошоци, 57,552.00 \$ отпаѓаат на капиталните

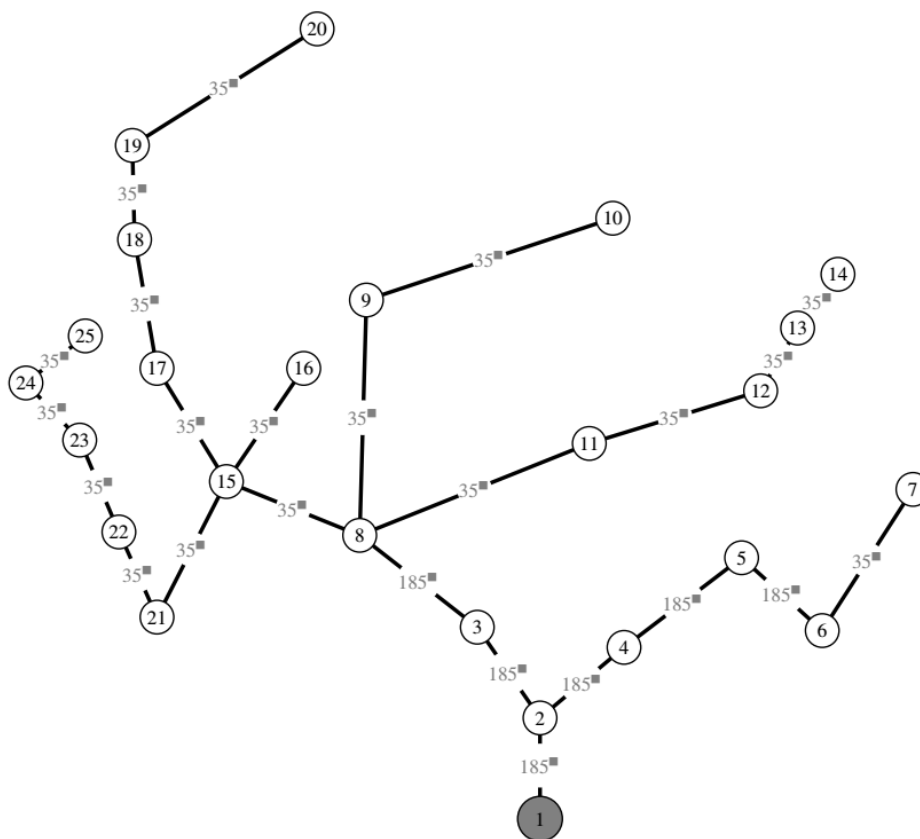
инвестициски трошоци сведени на годишно ниво, а 36,470.00 \$ се годишните трошоци поради технички загуби на активна енергија во мрежата. Во однос на решението добиено со детерминистички моделирана потрошувачка со користење на девет водови со различен пресек од табела 4.1, годишните трошоци се зголемени за 7.68%.

Во сценариото во кое се бара оптимално решение на проблемот за ОСПВ при користење на два типа на водови со различен пресек во услови на несигурна потрошувачка, ќе го анализираме само случајот кога  $\Gamma = 1$ . Податоците за  $ГГВ_k$ ,  $ДГВ_k$  и вкупното оптоварување во секоја итерација се прикажани во табела 7.5. На сликата 7.10 е прикажано конечното решение добиено во втората итерација.

Табела 7.5 Резултати од робусно решение за  $\Gamma = 1$ , за два вода со различен пресек

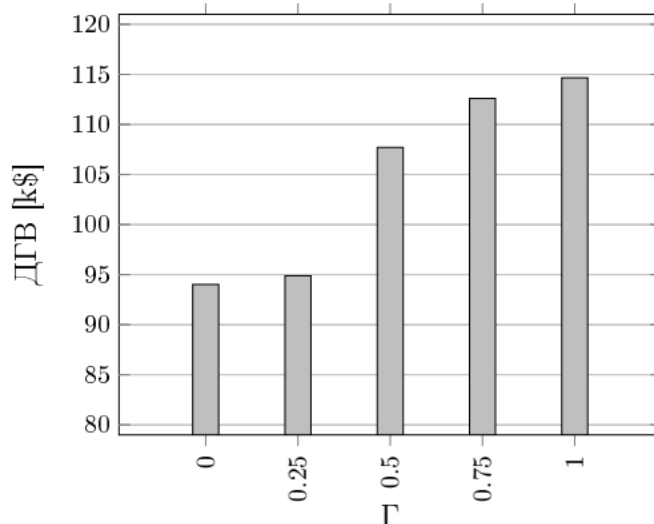
Итерација	$ГГВ_k$ [\$]	$ДГВ_k$ [\$]	$P_d$ [kW]
0	/	94,022.00	4,115.78
1	111,241.56	109,507.62	5,023.10
2	114,659.58	114,659.58	5,247.02

Во однос на робусното решение добиено со користење на девет различни типови на водови со различен пресек, има зголемување на годишните трошоци за 8.02%. Сепак, битно е да се напомене дека има и зголемување на дозволеното вкупно активно оптоварување во СДМ од 1.8%, што всушност е една од причините за зголемување на годишните трошоци. Тоа се должи на зголемените загуби на активна енергија во мрежата.



Слика 7.10 Робусно решение од оптимизациски метод за ОСПВ, за  $\Gamma = 1$ , трета итерација, два вода со различен пресек

Карактеристичен случај на предимензионирање на дел од СДМ поради користење на два типа на водови со различен пресек е делницата: 1 – 3 – 4 – 5 – 6. Големата вредност на активната моќност во јазлите 3, 4, 5 и 6 би предизвикала недозволените загуби на напон во водовите 1-3, 3-4, 4-5 доколку истите би биле изведени со вод со напречен пресек од  $35 \text{ mm}^2$ . Поради тоа, оптимизациската постапка одлучува тие критични водови да бидат со пресек од  $185 \text{ mm}^2$ , што е за два до три пати поголем пресек во однос на решението добиено кога е дозволено да се употребат девет водови со различен пресек (слика 7.6).



Слика 7.11 Зависност на ДГВ од  $\Gamma$  – два вода со различен пресек

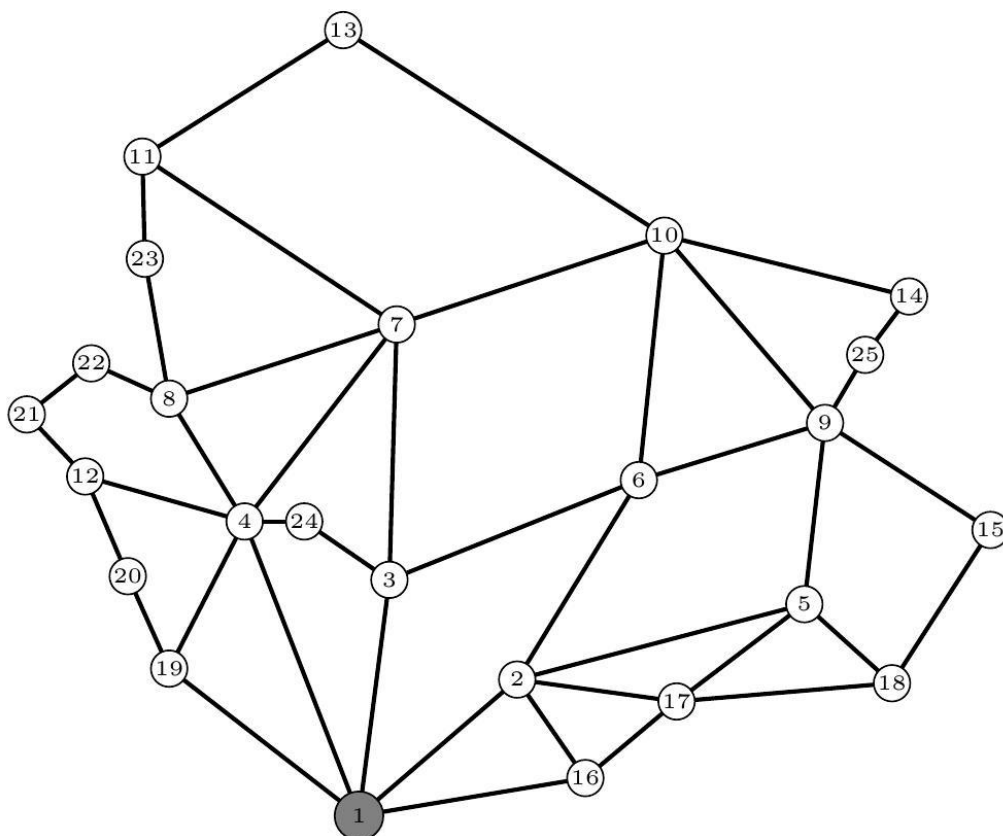
Зависноста на вредноста на функцијата на цел за различни вредности на  $\Gamma$  во случај кога е дозволено да се користат само два типа на водови со различен пресек, е прикажана на сликата 7.11.

## 7.2 Решавање на проблемот за ОКРДМ во услови на несигурна потрошувачка

На сликата 7.12 е прикажана СДМ во која има 24 потрошувачки јазли. На секој среднонапонски јазол има приклучено НДМ преку соодветен трансформатор. Во мрежата има вкупно 42 расположливи гранки. Целта на ОКРДМ е да одбере оптимална радијална топологија од множеството на расположливи гранки, во услови на најнеповолна распределба на несигурна потрошувачка. Притоа, треба да бидат запазени сите технички ограничувања од аспект на дозволените загуби на напон во мрежата и трајно дозволено струјно оптоварување на водовите. Вкупната врвна ангажирана моќност за секоја од 24-те НДМ е дефинирана преку интервалот на несигурност. Референтната вредност за активна моќност на јазлите од СДМ е дадена во табела 7.1. Тие се добиени со примена на стохастичкиот модел презентирани во поглавје 3. Граничните вредности од интервалот на несигурност се пресметани согласно изразите (5.32) и (5.33), во кои за отстапувањето на активната моќност е земена следната вредност:

$$P_{d_i}^{\Delta} = 0.5 \cdot P_{d_i}^{ref} \quad (7.2)$$

Функцијата на цел, која ги опишува вкупните годишни трошоци за проблемот на ОКРДМ, е дефинирана со изразот (5.1). Во неа се вклучени капиталните инвестициски трошоци, трошоците за неиспорачана електрична енергија поради евентуален испад на вод, како и трошоците поради загуба на електрична енергија во мрежата.



Слика 7.12 Граф на СДМ со 24 потрошувачки јазли и 42 расположливи гранки

Оптимизацискиот метод за ОКРДМ е применлив во областа на долгорочно планирање на радијални ДМ. Сепак, со интервенција во системската бинарна променлива  $b_i$ , постои можност моделот да се преформулира и да понуди решение за оптимално проширување на постојна радијална ДМ. Во зависност од обемот на проширувањето, методот наоѓа примена за краткорочни или среднорочни планирања на мрежата.

Покрај податоците за граничните вредности на интервалот на несигурна потрошувачка, дефинирани се и следните вредности за влезните параметри:

- напонот на напојниот јазол  $V_1 = 10$  kV,
- минимално дозволен напон во мрежата  $\underline{V} = 9.0$  kV,
- фактор на оптоварување  $\alpha = 0.6$ ,
- цена за неиспорачана електрична енергија  $c_u = 4$  \$/kWh,
- цена за загуби на електрична енергија  $c_l = 0.1$  \$/kWh,
- стапка на актуализација  $g = 0.05$ ,
- фактор на моќност  $\cos\varphi = 0.95$ ,
- податоци за водовите се дадени во табела 7.6.

Табела 7.6 Податоци за водовите

Почеток	Крај	$r$ [ $\frac{\Omega}{\text{km}}$ ]	$x$ [ $\frac{\Omega}{\text{km}}$ ]	Должина [km]	$I_{max}$ [A]	$\lambda$	$d$ [h]	$c_l$ [ $\frac{\text{k\$}}{\text{km}}$ ]	TP [k\$]
1	2	1.2	0.4	2.1	125	0.2	3	15	75

1	3	1.2	0.4	1.65	125	0.2	3	15	75
1	4	1.2	0.4	2.2	125	0.2	3	15	75
2	5	2.1	0.4	2	90	0.2	3	15	0
2	6	2.1	0.4	1.5	90	0.2	3	15	0
3	6	2.1	0.4	1.75	90	0.2	3	15	0
3	7	2.1	0.4	1.75	90	0.2	3	15	0
4	7	2.1	0.4	1.75	90	0.2	3	15	0
4	8	2.1	0.4	1	90	0.2	3	15	0
4	12	2.1	0.4	1	90	0.2	3	15	0
5	9	2.1	0.4	1.25	90	0.2	3	15	0
6	9	2.1	0.4	1.5	90	0.2	3	15	0
6	10	2.1	0.4	1.75	90	0.2	3	15	0
7	10	2.1	0.4	2	90	0.2	3	15	0
7	11	2.1	0.4	2	90	0.2	3	15	0
7	8	2.1	0.4	1.75	90	0.2	3	15	0
9	15	2.1	0.4	1.25	90	0.2	3	15	0
9	10	2.1	0.4	1.75	90	0.2	3	15	0
10	14	2.1	0.4	1.75	90	0.2	3	15	0
10	13	2.1	0.4	2.75	90	0.2	3	15	0
11	13	2.1	0.4	1.75	90	0.2	3	15	0
1	16	1.2	0.4	1.5	125	0.2	3	15	75
2	16	2.1	0.4	1.05	90	0.2	3	15	0
16	17	2.1	0.4	0.75	90	0.2	3	15	0
2	17	2.1	0.4	1.05	90	0.2	3	15	0
5	17	2.1	0.4	1	90	0.2	3	15	0
17	18	2.1	0.4	1.5	90	0.2	3	15	0
5	18	2.1	0.4	0.75	90	0.2	3	15	0
15	18	2.1	0.4	1.25	90	0.2	3	15	0
1	19	1.2	0.4	1.55	125	0.2	3	15	75
4	19	2.1	0.4	1	90	0.2	3	15	0
19	20	2.1	0.4	0.75	90	0.2	3	15	0
12	20	2.1	0.4	0.75	90	0.2	3	15	0



12	21	2.1	0.4	0.5	90	0.2	3	15	0
21	22	2.1	0.4	0.5	90	0.2	3	15	0
8	23	2.1	0.4	1.05	90	0.2	3	15	0
11	23	2.1	0.4	0.5	90	0.2	3	15	0
8	22	2.1	0.4	0.65	90	0.2	3	15	0
3	24	2.1	0.4	0.75	90	0.2	3	15	0
9	25	2.1	0.4	0.45	90	0.2	3	15	0
14	25	2.1	0.4	0.5	90	0.2	3	15	0
4	24	2.1	0.4	0.4	90	0.2	3	15	0

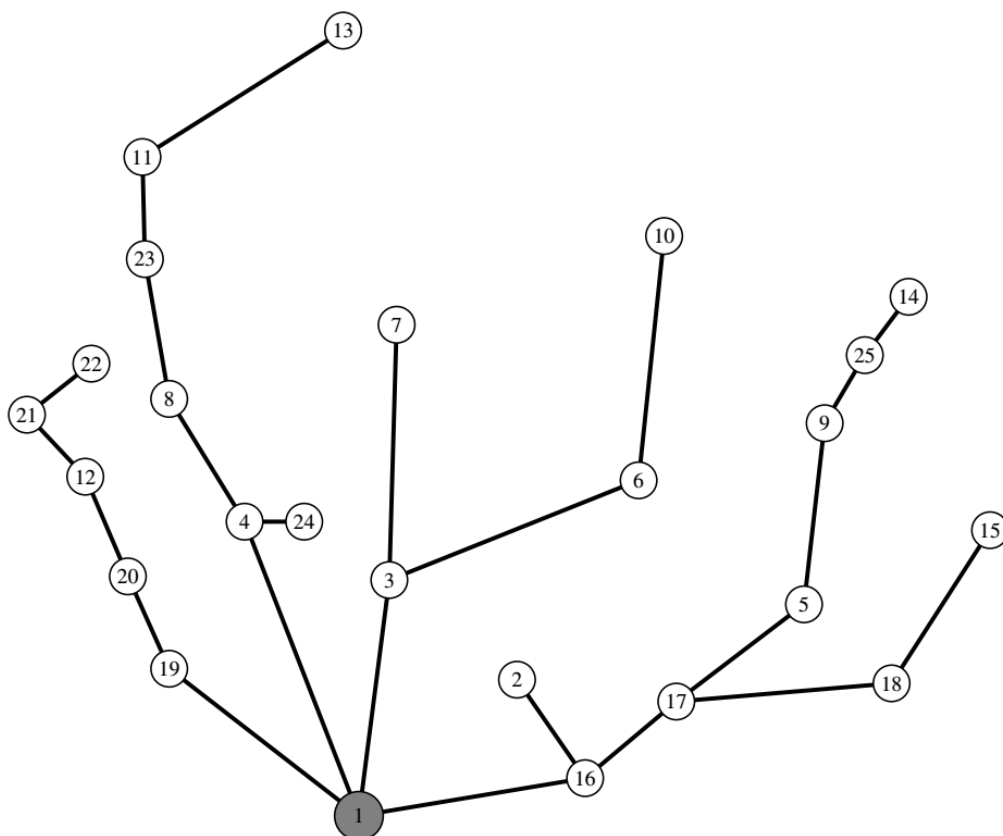
Првата и втората колона од табелата 7.6 се однесуваат на почетниот и крајниот јазол за секој вод од мрежата прикажана на слика 7.12. Во третата и четвртата колона се прикажани подолжната распределена активна и реактивна отпорност на водовите. Капацитивноста на водовите е занемарена. Во петтата колона е дадена должината, а во шестата трајно дозволеното струјно оптоварување за секој вод. Во седмата колона е дадена стапката на испад, а во осмата е времето потребно за поправка на повредениот вод. Во деветтата колона се прикажани трошоците за изведба во единица должина. Доколку водот е приклучен на напојната трансформаторска станица, трошоците за приклучок на истата се прикажани во десеттата колона.

При користење на оптимизацискиот метод за ОКРДМ при детерминистичко моделирање на потрошувачката елабориран во потпоглавје 5.3, активната моќност на потрошувачките јазли е еднаква на референтната вредност на активната моќност  $P_{d_i}^{ref}$  презентирани во табела 7.1. Резултатот постигнат со користење на овој метод е прикажан на слика 7.13, каде со полни линии се прикажани водовите кои се одбрани во конечното решение. Вкупното оптоварување во целокупната СДМ изнесува 4,115.78 kW.

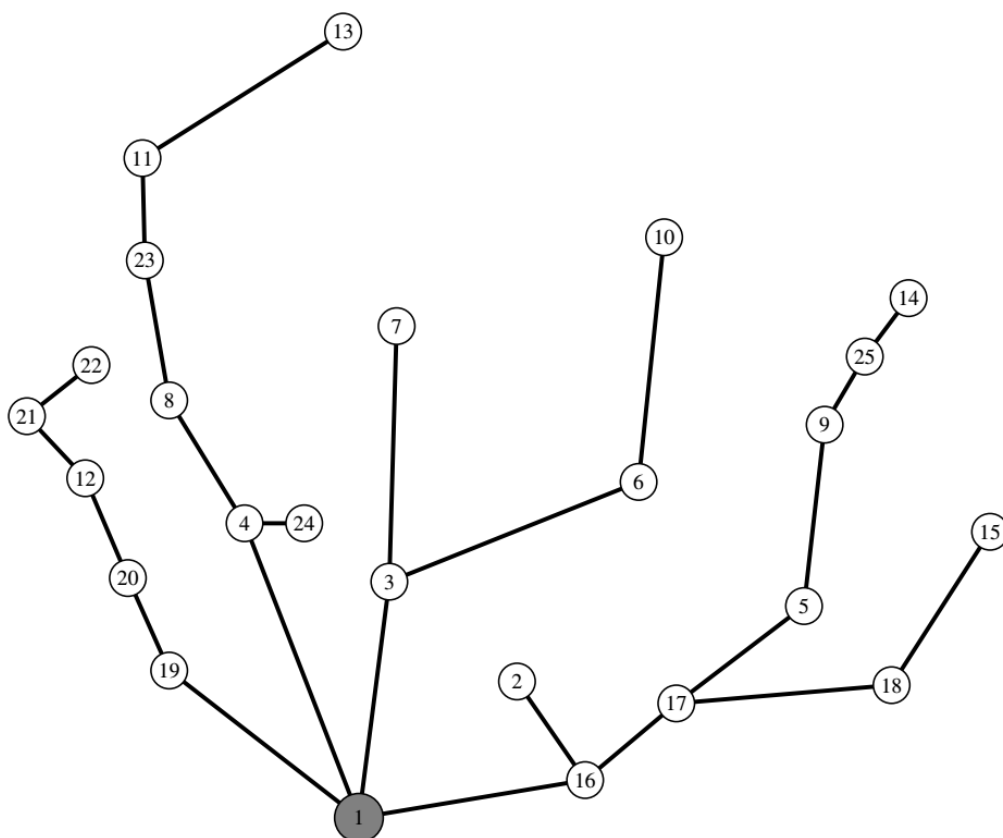
Вкупната вредност на функцијата на цел од детерминистичкото решение, кое ги претставува годишните трошоци, изнесува 80,297.68 \$. Од нив, 35,325.00 \$ се капиталните инвестициски трошоци, 24,368.62 \$ се трошоците поради загуби на енергија во мрежата, а 20,604.06 \$ се трошоци поради неиспорачана електрична енергија во случај на испад на вод.

Најголемата загуба на напон е во делницата до јазолот со реден број 14. Напонот во тој јазол е  $V_{14} = 9.153$  kV, кој го задоволува условот за минимално дозволената загуба на напон во мрежата. Привидната моќност во водот 1-16 изнесува  $S_{1-16} = 1.663$  MVA. Овој вод е најоптоварен во мрежата, со 76.9% оптоварување од максимално дозволеното.

Согласно податоците презентирани во поглавје 5.4, оптимизацискиот метод за ОКРДМ при несигурна потрошувачка се решава на начин што основниот проблем се дели на два проблема: главен проблем и потпроблем. Добиеното решение е робусно бидејќи активната моќност на потрошувачите во потпроблемот не е дефинирана со еднозначна вредност, туку со променливата  $P_{d_i}$ . Граничните вредности кои може да ги добие променливата  $P_{d_i}$  се дефинирани со интервалот на несигурност.



Слика 7.13 Детерминистичко решение од оптимизацискиот метод за ОКРДМ



Слика 7.14 Робусно решение од оптимизацискиот метод за ОКРДМ, за  $\Gamma = 0$

Оптимизацискиот метод за ОКРДМ при несигурна потрошувачка е решен за две карактеристични вредности за буџетот на несигурност:  $\Gamma = 0$  и  $\Gamma = 1$ . Кога  $\Gamma = 0$ , во решавањето се занемарува несигурноста на  $P_{d_i}$  и согласно изразот (5.35) се добива вредноста:

$$P_{d_i} = P_{d_i}^{ref} \quad (7.3)$$

Кога  $\Gamma = 0$ , решаваме пример во кој нема воведено несигурност во активната моќност. Тоа значи дека проблемот се решава со еднозначни вредности. Затоа, решението добиено кога  $\Gamma = 0$  е исто со решението добиено при детерминистички моделирана потрошувачка. Вкупната активна моќност во целокупната СДМ е 4,115.78 kW. Вредноста на функцијата на цел е 80,297.68 \$, од кои 35,325.00 \$ се капиталните инвестициски трошоци, а 44,972.68 \$ се годишните трошоци за неиспорачана електрична енергија поради испад на вод и трошоците поради загуби на електрична енергија во мрежата.

Робусното решение кога  $\Gamma = 0$  е добиено по само две пресметковни итерации, вклучувајќи ја и нултата почетна итерација решена со оптимизациски метод при детерминистичко моделирана потрошувачка. На слика 7.14 е прикажано решението за вредност на буџетот на несигурност  $\Gamma = 0$ . Еднаквоста помеѓу резултатите прикажани на слика 7.13 и 7.14, ја потврдува валидноста на решението добиено со примена на оптимизациски метод за ОКРДМ при несигурна потрошувачка.

Согласно изразот (5.35), кога  $\Gamma = 1$  дозволуваме максимална несигурност на променливата  $P_{d_i}$ . Според тоа,  $P_{d_i}$  може да ја добие било која вредност од интервалот на несигурност. Решението е добиено после три пресметковни итерации, вклучувајќи ја и почетната нулта. Резултатите добиени за  $\Gamma V_k$ ,  $D\Gamma V_k$  и вкупното оптоварување во СДМ, за секоја пресметковна итерација се прикажани во табела 7.7. Меѓу-решенијата за оптималната конфигурација на радијалната мрежа добиени во секоја итерација се прикажани на сликите 7.15 и 7.17.

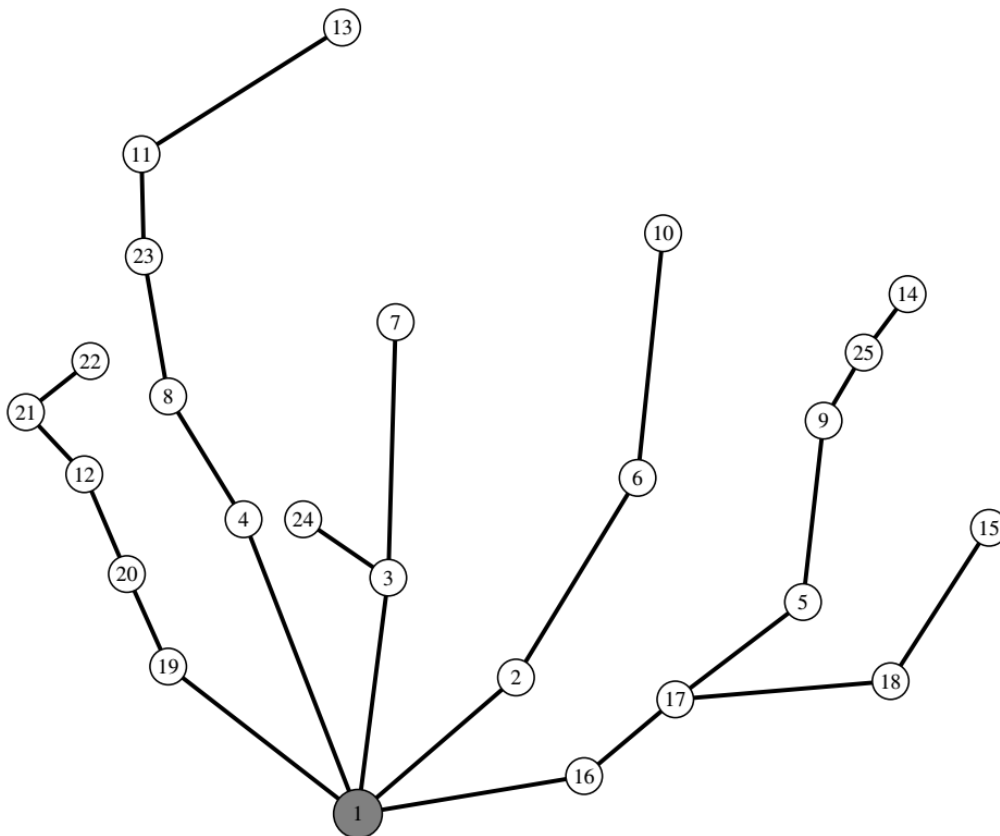
Табела 7.7 Резултати од робусно решение за  $\Gamma = 1$

Итерација	$\Gamma V_k$ [\$]	$D\Gamma V_k$ [\$]	$P_d$ [kW]
0	/	80,297.68	4,115.78
1	108,849.24	107,537.37	5,822.85
2	111,164.19	111,164.19	5,943.54

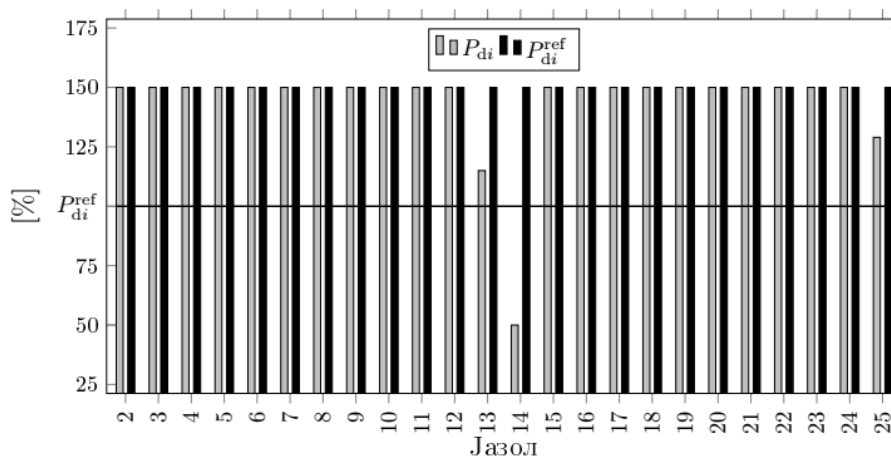
Со решавањето на потпроблемот од оптимизацискиот метод за ОКРДМ при несигурна потрошувачка, се добива најнеповолната распределба на несигурната променлива  $P_{d_i}$ . Согласно податоците презентирани во потпоглавје 5.4.1, функцијата на цел во потпроблемот се однесува само на трошоците поврзани со неиспорачана електрична енергија поради испад на вод и трошоците поради загуба на електрична енергија во мрежата. Бидејќи потпроблемот е дефиниран да ја пребарува максималната вредност од функцијата на цел, добиеното решение е робусно и за најнеповолната распределба на  $P_{d_i}$ , при највисоки трошоци за неиспорачана електрична енергија и технички загуби.

На сликата 7.16 со сива боја е прикажана распределбата на несигурната променлива  $P_{d_i}$  добиена како резултат од последната итерација. Таа е изразена во проценти од референтната вредност  $P_{d_i}^{ref}$ . Со црна боја е означена максималната

вредност од интервалот на несигурност  $\bar{P}_{di}$ . Иако во потпроблемот ја пребаруваме највисоката (најнеповолната) распределба на активната моќност, поради задоволување на други ограничувања во методот, сите јазли во мрежата не ја добиваат својата максимална вредност. Причина за тоа е ограничувањето за минимален дозволен напон, дефиниран со изразот (5.5). Бидејќи вредноста на напоните во критичните јазли изнесува:  $V_{13} = 9.000 \text{ kV}$ ,  $V_{14} = 9.000 \text{ kV}$  и  $V_{25} = 9.009 \text{ kV}$ , активната моќност во овие јазли не ја достигнува својата максимална вредност.



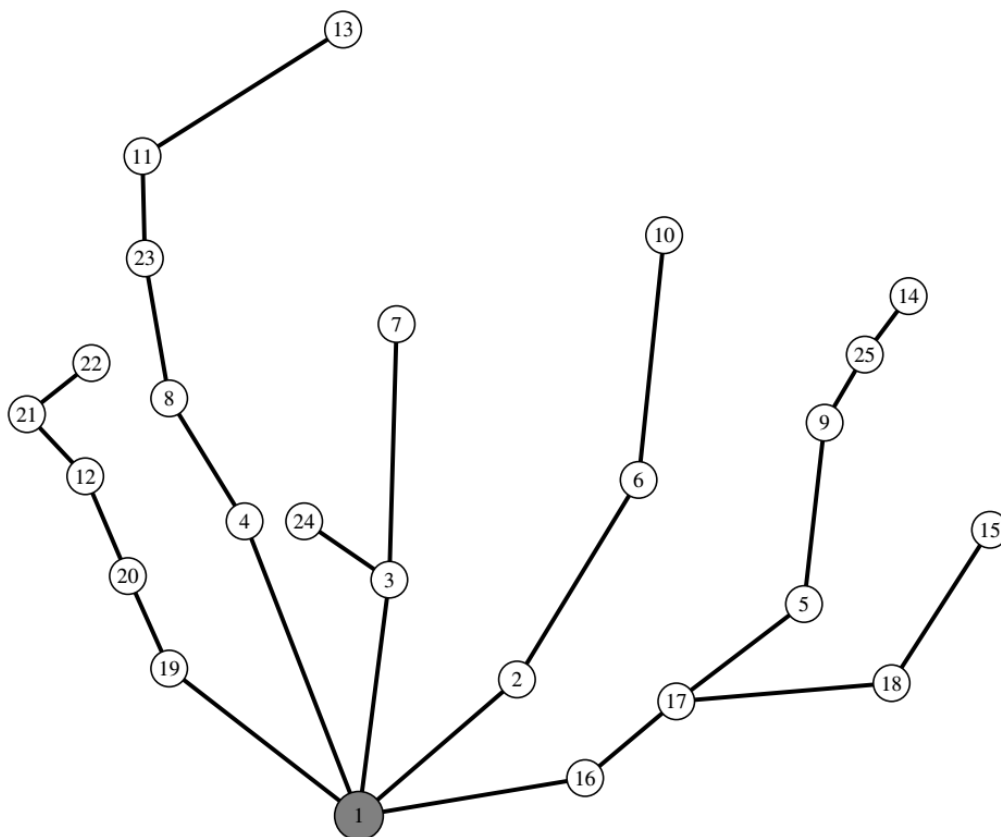
Слика 7.15 Робусно решение од оптимизацискиот метод за ОКРДМ, за  $\Gamma = 1$ , прва итерација



Слика 7.16 Распределба на  $P_{di}$  од последната итерација

Вредностите добиени за  $P_{di}$  во секоја итерација, се користат за зголемување на бројот на променливи и ограничувања во главниот проблем. На тој начин, во секоја

итерација, главниот проблем се зголемува. Условот за прекин на итеративната постапка е дефиниран со изразот (5.86). Како решение за вкупните годишни трошоци и вредноста на системската променлива  $b_i$  се земаат резултатите од последната итерација.



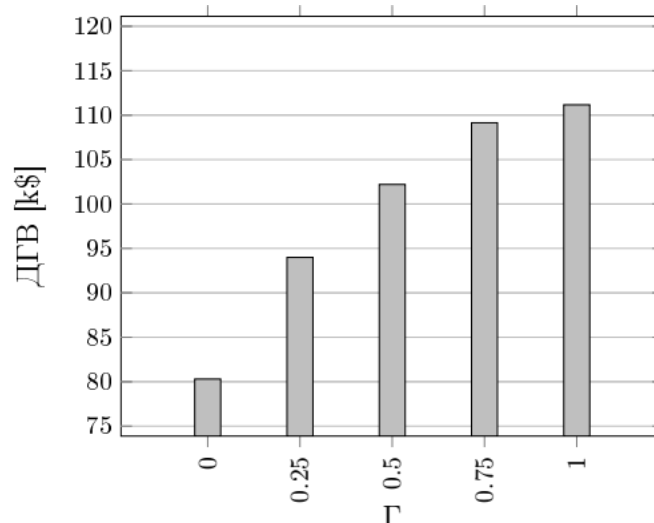
Слика 7.17 Робусно решение од оптимизацискиот метод за ОКРДМ, за  $\Gamma = 1$ , втора итерација

Согласно податоците презентирани во табела 7.7, најголемата вкупна активна моќност е добиена во последната итерација и изнесува 5,943.54 kW. Вкупните годишни трошоци во тој случај изнесуваат 111,164.19 \$. Во однос на детерминистичкото решение, се забележува зголемување за 44 % на вкупната активна моќност за сметка на 38 % зголемување на годишните трошоци. Иако делува дека решението добиено со примена на оптимизацискиот метод за ОКРДМ при несигурна потрошувачка е поскапо во однос на решението добиено со оптимизациски метод за ОКРДМ при детерминистичко моделирана потрошувачка, сепак робусното решение е поевтино од аспект на идното зголемување на потрошувачката во мрежата.

Податоците презентирани во табелата 7.7 се однесуваат за буџет на несигурност  $\Gamma = 1$ . Бидејќи со  $\Gamma$  се врши фина регулација на степенот на несигурност при решавањето, битно е да се испита зависноста на годишните трошоци од  $\Gamma$ . Согласно податоците на сликата 7.18, за помали вредности на  $\Gamma$  се дозволува помало зголемување на вкупната активна моќност во мрежата, а со тоа се намалуваат и годишните трошоци. За поголеми вредности на  $\Gamma$ , се дозволува поголеми вредности за вкупната активна моќност, а со тоа се зголемуваат и годишните технички загуби во мрежата.

Оптимизацискиот метод за ОКРДМ при несигурна потрошувачка може да се примени и во услови на проширување на веќе изградена мрежа. Во зависност од бројот на гранки за кои се проширува мрежата, можни се краткорочни или среднорочни

планирања на истата. Со цел примена на развиениот метод за проширување на постојна мрежа, потребно е рачно да се интервенира во системската бинарна променлива  $b_i$ .



Слика 7.18 Зависност на ДГВ од  $\Gamma$

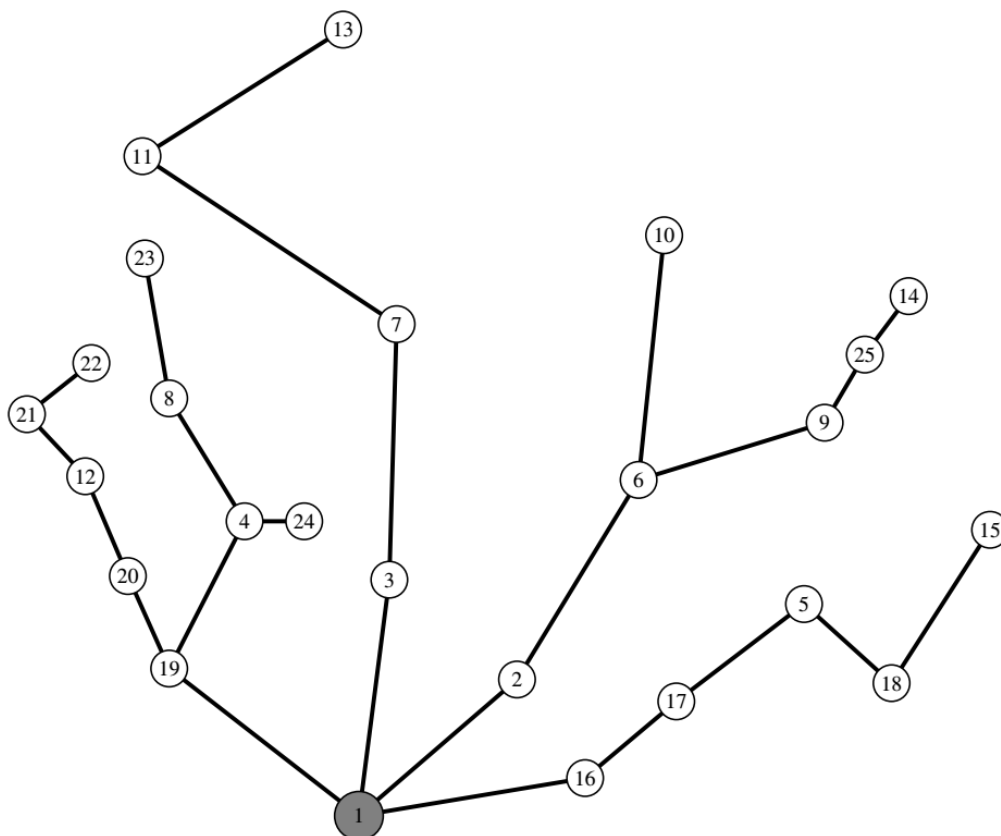
Согласно карактеристиките на методот презентирани во потпоглавје 5.3, системската променлива  $b_i$  е бинарна и одлучува кој од водовите ќе биде вклучен во конечното решение. Таа има форма на вектор, со број на елементи колку што има расположливи гранки во графот на мрежата прикажан на слика 7.12. Откако ќе заврши оптимизациската процедура, се добива резултат за тоа кој елемент од векторот  $b_i$  ќе има вредност 0, а кој 1. Доколку елементот е со вредност 0, тоа значи дека соодветниот вод не е вклучен во конечното решение. Ако елементот е со вредност 1, соодветниот вод е вклучен во конечното решение. За оптимално да го решиме проблемот на проширување на веќе изградена СДМ во услови на несигурна потрошувачка, потребно е за секој вод од постојната мрежа рачно да запишеме вредност 1 во соодветниот елемент од векторот  $b_i$ . На тој начин, моделот ќе одлучува само за оние водови кај кои нема дефинирана вредност за соодветниот елемент од векторот  $b_i$ .

Со цел презентирање на можноста за вклучување на одредени водови во конечното решение, наместо анализа на сценарио во кое ќе се изврши проширување на веќе изградена мрежа, анализирано е покомплексно сценарио во кое однапред се вклучени два вода во конечното решение. Водовите 6-9 и 7-11 не се вклучени во детерминистичкото решение (слика 7.13) и робусното решение (слика 7.17). Затоа, овие водови ќе бидат однапред вклучени во конечното решение со цел тестирање на оптимизациската постапка во наоѓање оптимално решение во вака дефинирано сценарио. Карактеристиките на двата вода се прикажани во табела 7.8.

Табела 7.8 Параметри на два вода однапред вклучени во конечна топологија

Почеток	Крај	$r$ [ $\frac{\Omega}{km}$ ]	$x$ [ $\frac{\Omega}{km}$ ]	Должина [km]	$I_{max}$ [A]	$\lambda$	$d$ [h]	$c_i$ [ $\frac{k\$}{km}$ ]	TP [k\$]
6	9	2.1	0.4	1.5	90	0.2	3	15	0
7	11	2.1	0.4	2	90	0.2	3	15	0

Најпрво, анализирано е решението добиено со примена на оптимизацискиот метод за ОКРДМ при детерминистичко моделирана потрошувачка. Активната моќност на потрошувачките јазли во СДМ е еднаква на  $P_{d_i}^{ref}$  и вкупното оптоварување во мрежата изнесува 4,115.78 kW. Решението е прикажано на слика 7.19.



Слика 7.19 Детерминистичко решение од оптимизацискиот метод за ОКРДМ со однапред вклучени два вода во конечното решение

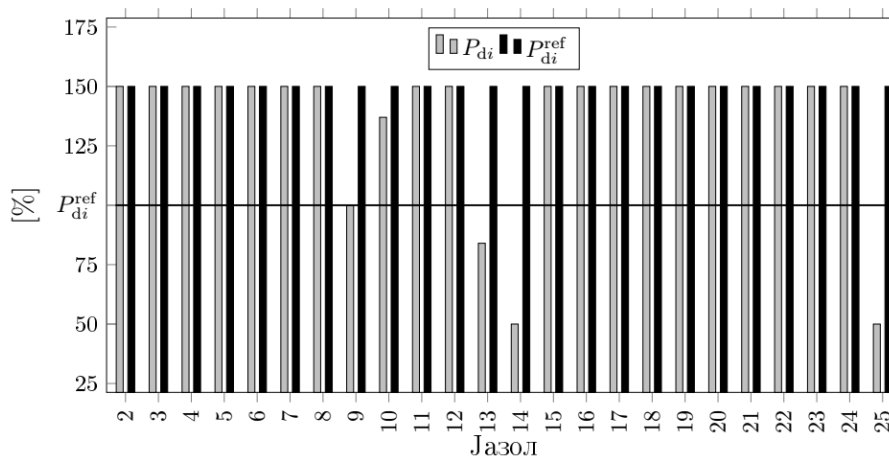
Вкупните годишни трошоци добиени од детерминистичкото решение изнесуваат 83,464.77 \$. Од нив, 35,775.00 \$ отпаѓаат на капиталните инвестициски трошоци, 21,717.53 \$ се трошоците за неиспорачана електрична енергија поради испади на вод и 25,972.24 \$ се годишни трошоци поради загуби на електрична енергија во мрежата. Во споредба со детерминистичкото решение добиено без интервенција во системската бинарна променлива  $b_i$ , вкупните годишни трошоци се зголемени за 3.9 %.

Примената на оптимизацискиот метод за ОКРДМ при несигурна потрошувачка ќе биде анализирана само во случајот кога  $\Gamma = 1$ . Бидејќи водовите 6-9 и 7-11 не се вклучени во робусното решение прикажано на слика 7.17, се очекува рачната интервенција со вклучување на овие два вода во конечното решение да предизвика промени во вкупното врвно оптоварување во СДМ.

Робусното решение е добиено после четири пресметковни итерации, вклучувајќи ја и нултата итерација. Вредностите за  $\Gamma V_k$ ,  $DGV_k$  и вкупното оптоварување во целокупната СДМ се прикажани во табела 7.9. Анализирајќи ги податоците презентирани во табела 7.9, делува дека нема промена во вкупното врвно оптоварување во првата, втората и третата итерација. Сепак, разликите во промената на врвното оптоварување во секоја итерација се мали и влијаат во промената на вкупните годишни

трошоци прикажани во третата колона од табелата 7.9. На сликата 7.21 е прикажано конечното решение добиено во третата итерација.

Во однос на робусното решение добиено без рачна интервенција во системската променлива  $b_i$ , има намалување на годишните трошоци за 3.6%. Причина за намалувањето на трошоците е намалување на вкупната активна моќност. Вкупната активна моќност е намалена за 4.4% во однос на робусното решение во кое не е направена рачна интервенција во системската променлива  $b_i$ . На сликата 7.20 е прикажана распределбата на несигурната потрошувачка добиена како резултат од последната итерација. Таа е изразена во проценти од референтната вредност  $P_{d_i}^{ref}$ .



Слика 7.20 Распределба на  $P_{d_i}$  од последната итерација

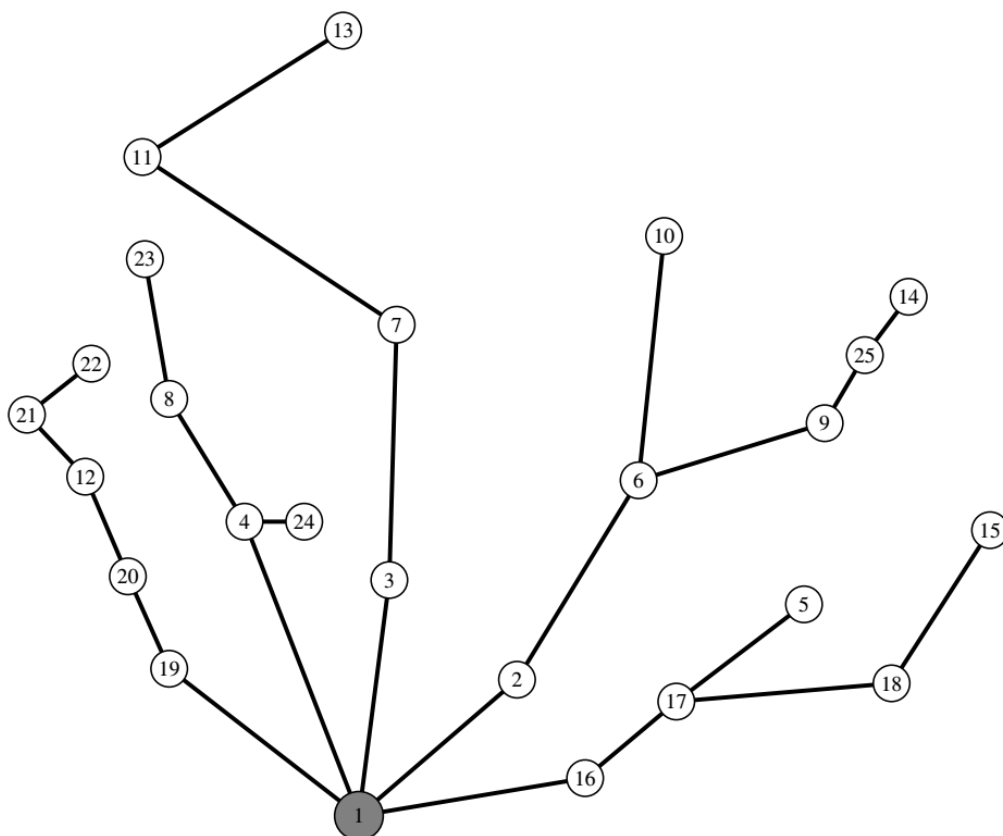
Во робусното решение прикажано на слика 7.17, во кое не е направена рачна интервенција во системската променлива  $b_i$ , има само два јазли кои ја достигнуваат минимално дозволената вредност за напонот. Тоа се јазлите  $V_{13} = 9.000 \text{ kV}$  и  $V_{14} = 9.000 \text{ kV}$ . Во робусното решение прикажано на слика 7.21, во кое однапред се вклучени водовите 6-9 и 7-11, постојат три јазли кои ја достигнуваат минимално дозволената вредност за напонот. Тоа се јазлите:  $V_{13} = 9.000 \text{ kV}$ ,  $V_{14} = 9.000 \text{ kV}$  и  $V_{10} = 9.000 \text{ kV}$ . Полошите напонски профили во мрежата добиена со рачна интервенција во системската променлива  $b_i$  се главната причина зошто има намалување во вкупната активна моќност  $P_d$ .

Зависноста на вредноста на вкупните годишни трошоци со примена на оптимизацискиот метод ОКРДМ при несигурна потрошувачка, за различни вредности на  $\Gamma$  во сценарио во кое е направена рачна интервенција во системската променлива  $b_i$ , е прикажана на слика 7.22.

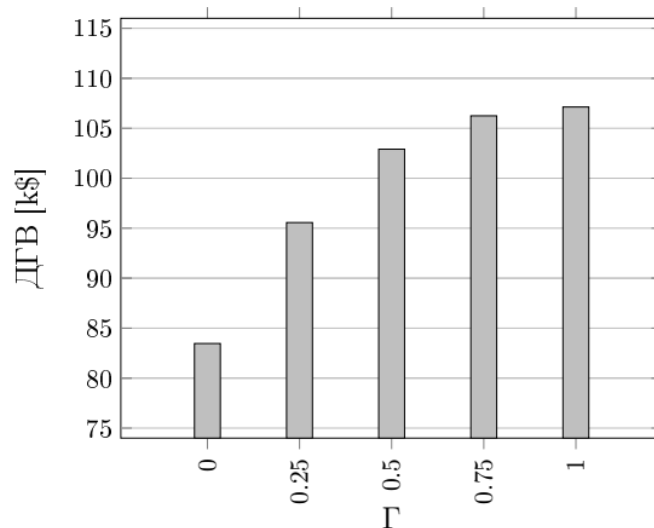
Табела 7.9 Резултати од робусно решение за  $\Gamma = 1$

Итерација	ГГВ <sub>k</sub> [\$]	ДГВ <sub>k</sub> [\$]	$P_d$ [kW]
0	/	83,464.77	4,115.78
1	108,860.05	107,127.95	5,684.42
2	107,127.96	107,127.97	5,684.42
3	107,127.96	107,127.96	5,684.42





Слика 7.21 Робусно решение од оптимизацискиот метод за ОКРДМ со однапред вклучени два вода во конечното решение



Слика 7.22 Зависност на ДГВ од  $\Gamma$

### 7.3 Решавање на проблемот за ОКРДМ-ОЛДБС во услови на несигурна потрошувачка

Во однос на употребениот математички апарат, проблемот за решавање на ОКРДМ-ОЛДБС е посложен во однос на основниот ОКРДМ проблем. Тоа се должи пред сè на три-фазната робусна оптимизација дефинирана во потпоглавје 6.4. Имено, како што беше претходно наведено, за да може да се примени итеративниот ДПО алгоритам

потребно е обединување на втората и третата фаза од оптимизацискиот метод со примена на ККТ условите.

Сепак, од аспект на примена на ОКРДМ-ОЛДСБ, тој претставува надополнување на основниот оптимизациски метод за ОКРДМ при несигурна потрошувачка. Од тие причини, во ова поглавје ќе го анализираме добиеното решение од ОКРДМ-ОЛДСБ само од аспект на локацијата и моќноста на поставените СБС. За таа цел, ќе биде употребена истата СДМ за тестирање на оптимизацискиот метод од претходното потпоглавје.

Мрежата е прикажана на слика 7.12, а параметрите на водовите се дадени во табела 7.6. За референтна вредност на активната моќност во јазлите  $P_{d_i}^{ref}$ , се употребени податоците прикажани во табела 7.1. Екстремните вредности од интервалот на несигурност се пресметани согласно изразите (5.32) и (5.33), во кои за отстапување на активната моќност е земена вредноста:

$$P_{d_i}^{\Delta} = 0.25 \cdot P_{d_i}^{ref} \quad (7.4)$$

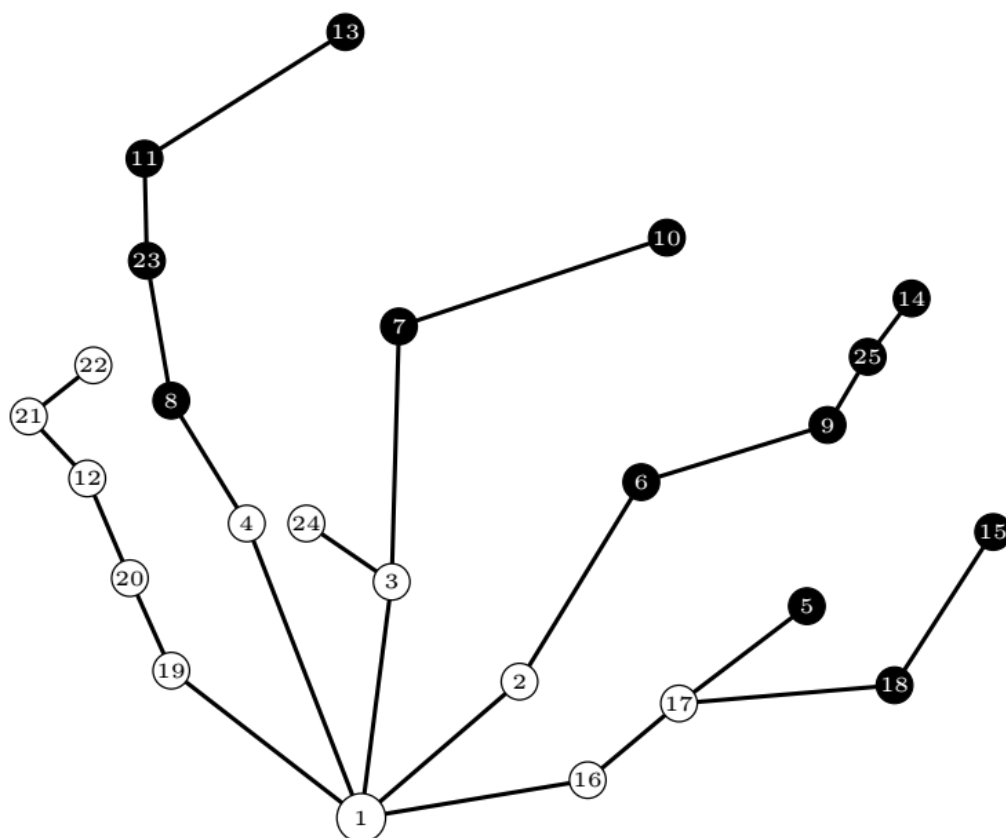
Покрај податоците за граничните вредности на интервалот на несигурна потрошувачка, во моделот се користат и следните вредности за влезните параметри:

- напонот на напојниот јазол  $V_1 = 10 \text{ kV}$ ,
- минимално дозволен напон во мрежата  $\underline{V} = 9.0 \text{ kV}$ ,
- фактор на оптоварување  $\alpha = 0.6$ ,
- цена за загуби на електрична енергија  $c_l = 0.1 \text{ \$/kWh}$ ,
- цена за поставување на СБС  $C_{ESS} = 5000 \text{ \$}$
- цена за единечна моќност на СБС  $C_{EP} = 150 \text{ \$/kW}$ ,
- цена за единечна енергија на СБС  $C_{EE} = 370 \text{ \$/kWh}$ ,
- стапка на актуализација за водовите  $g = 0.05$ ,
- стапка на актуализација за СБС  $g_e = 0.05$ ,
- ефикасност на полнење/празнење на СБС  $\mu_c = 0.81$ ,
- број на временски сегменти за кои се пресметува енергијата на СБС  $l = 20$ ,
- максимално дозволена моќност на СБС  $\bar{P}_e = 30 \text{ kW}$ ,
- минимално дозволена моќност на СБС  $\underline{P}_e = 0 \text{ kW}$ ,
- фактор на моќност за сите потрошувачки јазли во СДМ  $\cos\phi = 0.9$ .

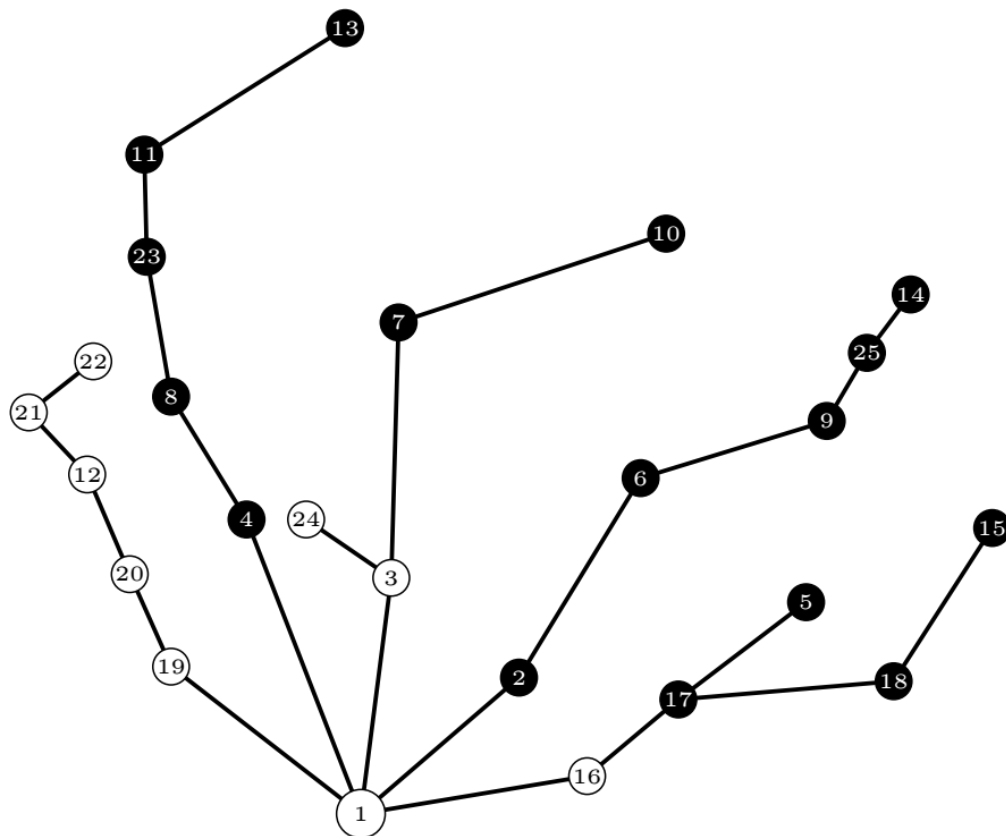
При детерминистичко решавање на проблемот за ОКРДМ-ОЛДСБ, употребен е оптимизацискиот метод презентираан во потпоглавје 6.3. За оптоварувањата во јазлите се употребени референтните вредности за активна моќност  $P_{d_i}^{ref}$  дадени во табела 7.1. Резултатите од пресметката се прикажани на слика 7.23.

Јазлите обележани со црна боја се оние во кои се поставуваат СБС. Вкупното оптоварување во целокупната СДМ изнесува 4,115.78 kW. Вкупната вредност на функцијата на цел од детерминистичкото решение изнесува 129,270.77\$. Од нив, 40,312.50 \$ се капиталните инвестициски трошоци за изградба на водовите, 46,338.67 \$ се трошоците поради загуби на електрична енергија во мрежата, 3,250.00\$ се трошоци за поставување на СБС, 2,925.00 \$ се трошоците за вкупната инсталирана моќност на СБС и 36,444.60 \$ се трошоците за вкупната инсталирана енергија на СБС.

При решавање на оптимизацискиот метод за ОКРДМ-ОЛДСБ при несигурна потрошувачка, податоците за екстремните вредности од интервалот на несигурност се пресметани со уважување на изразот (7.4). Со овој израз се пресметуваат отстапувањата на активната моќност од референтната.



Слика 7.23 Детерминистичко решение од оптимизацискиот метод за ОКРДМ-ОЛДБС



Слика 7.24 Робусно решение од оптимизацискиот метод за ОКРДМ-ОЛДБС

---

Решението прикажано на слика 7.24 е добиено за  $\Gamma = 1$ , и може да се заклучи дека оптимизацискиот метод предлага да се постават дополнителни три СБС во однос на детерминистичкото решение.

Со поставување на СБС во јазлите 2, 4 и 17, се задоволуваат сите технички ограничувања во мрежата кои настануваат поради зголемувањето на оптоварувањето и не се јавува потреба од промена на конфигурацијата на СДМ во робусното решение. Активната моќност на сите СБС е еднаква на максимално дозволената вредност  $\bar{P}_e = 30 \text{ kW}$ . Вкупното активно оптоварување во мрежата изнесува  $\sum_{i \in \mathcal{D}} P_{d_i} = 5,137.12 \text{ kW}$ .

Битно е да се напомене дека оптимизацискиот метод за ОКРДМ-ОЛДБС при несигурна потрошувачка може да најде примена и во фаза на среднорочно планирање на СДМ. Имено, доколку од различни причини не постои можност за преконфигурација на мрежата, поставувањето на СБС може да помогне во задоволување на техничките ограничувања. Во таков случај, сите вредности за системската променлива  $b_i$  рачно ќе се нагодат согласно постојната топологија на СДМ, а оптимизациската постапка ќе одлучи во кои јазли од мрежата да се постават СБС.

## 8 ЗАКЛУЧОК

Во оваа докторска дисертација се изработени три нови оптимизациски методи за оптимално планирање на радијални ДМ во услови на несигурна потрошувачка. Несигурната потрошувачка се должи на очекуваното зголемено приклучување на ЕВ за полнење и производители на електрична енергија базирани на технологии на ОИЕ во НДМ. Во научната литература, оптимално планирање на ДМ при несигурна потрошувачка се постигнува преку моделирање на потрошувачката со користење на стохастички методи и методи со решавање на повеќе сценарија. Во дисертацијата се развиени три нови методи чија задача е да ја уважат несигурната потрошувачка на поедноставен и поефикасен начин, преку користење на две гранични вредности кои го претставуваат интервалот на несигурност. Трите оптимизациски методи, кои решаваат поединечни проблеми од пошироката област на ОПДС, се базираат на принципите на робусна оптимизација. Бидејќи несигурната потрошувачка е опишана само со две вредности, се надминуваат проблемите од аспект на комплексноста на дефинирање на несигурната потрошувачка во однос на методите кои се користат во литературата.

Во математичката наука постојат два алгоритми за решавање на општ проблем од областа на РО: БДЗ и ДПО. За примена на БДЗ алгоритмот потребно е да се употреби дуално програмирање за наоѓање на дуалните променливи од потпроблемот дефиниран во втората фаза од РО. Проблемот на оптимално планирање на радијални ДМ користи бинарна променлива за опишување на топологијата на мрежата, поради што истиот припаѓа во класата на мешано целобројно програмирање. Според досегашните познавања на авторот, во математичката наука не постои едноставна директна процедура за дефинирање на дуален проблем и исполнување на условите за јака дуалност, кога во основниот проблем системската променлива е бинарна. Затоа, применливоста на БДЗ алгоритмот за оптимално планирање на ДМ со несигурна потрошувачка е отежната. Од друга страна, ДПО алгоритмот е поефикасен и конвергира за помал број на итерации во споредба со БДЗ алгоритмот. Токму затоа во ова докторска дисертација е употребен ДПО алгоритмот како појдовна точка за развивање на три нови оптимизациски методи за оптимално планирање на ДМ во услови на несигурна потрошувачка.

Прецизноста во одредувањето на граничните вредности од интервалот на несигурност значително влијае на резултатите добиени од оптимизациските методи. Бидејќи полнењето на ЕВ и производството на електрична енергија од ОИЕ се во својата природа непредвидливи процеси, нивното приклучување во НДМ предизвикува потешкотии во прогнозата на вкупната ангажирана активна моќност во мрежата. За соодветно уважување на случајната природа на овие технологии, во докторатот е развиен стохастички модел заснован на методот на МК за соодветно моделирање на потрошувачката. Во стохастичкиот модел се развиени три посебни модели:

- модел кој ги симулира дневните енергетски потреби за полнење на едно ЕВ,
- модел кој ја симулира дневната производна крива на една фотонапонска централа приклучена на НДМ,
- модел кој ги симулира дневните енергетски потреби на едно домаќинството.

Во литературата, дневните енергетски потреби на ЕВ за полнење најчесто се моделираат со нормална Гаусова распределба. Во докторатот е развиен нов модел, каде

дневните енергетски потреби на ЕВ се симулираат со користење на податоци достапни во анкети кои ги регистрираат транспортните навики на луѓето. На тој начин, се добива попрецизен модел кој користи реални податоци во симулирањето на дневните потреби за полнење на ЕВ.

Од пошироката област за ОПДС, во оваа дисертација се развиени три нови оптимизациски методи за оптимално планирање на радијална ДМ во услови на несигурна потрошувачка: оптимизациски метод за ОСПВ, оптимизациски метод за ОКРДМ и оптимизациски метод за ОКРДМ-ОЛДБС. Во функцијата на цел од оптимизацискиот метод за ОСПВ вкалкулирани се капиталните инвестициски трошоци сведени на годишно ниво преку соодветна стапка за актуализација и годишните трошоци поради загуби на електрична енергија во мрежата. Во оптимизацискиот метод за ОКРДМ, покрај капиталните инвестициски трошоци и трошоците поради загуби на електрична енергија во ДМ, вклучени се и трошоците за неиспорачана електрична енергија поради евентуален испад на некој од водовите. Во оптимизацискиот метод за ОКРДМ-ОЛДБС се вклучени капиталните инвестициски трошоци за изградба на водовите и СБС, како и годишните трошоци за загуба на електрична енергија.

Оптимизацискиот метод за ОСПВ најчесто припаѓа во класата на краткорочни или среднорочни планирања на ДМ. Главна цел е да ги одреди пресеците на водовите во ДМ со позната конфигурација на оптимален начин, во услови на несигурна потрошувачка на активна моќност. Оптимизациските методи за ОКРДМ и ОКРДМ-ОЛДБС најчесто припаѓаат во класата на среднорочни и долгорочни планирања на ДМ. Целта на овие методи е да ја одредат оптималната конфигурација на радијална ДМ од множество на гранки, како и оптимална локација и моќност на СБС.

Во дисертацијата се изведени соодветни оптимизациски методи за трите проблеми кои даваат решение при детерминистичко моделирани вредности за потрошувачката на активна моќност. Овие оптимизациски методи се користат како основа за аналитичко изведување и нивна надградба во оптимизациски методи при несигурна потрошувачка. Бидејќи оптимизацискиот метод за ОКРДМ-ОЛДБС е дефиниран како три-фазна РО, а со цел примена на ДПО алгоритмот, извршено е и соодветно преформулирање на функцијата на цел во соодветна дво-фазна РО со примена на ККТ условите за слаба дуалност.

Системските променливи во трите оптимизациски методи се бинарни. Во дел од техничките ограничувања, системската бинарна променлива се множи со континуирана променлива. Со цел линеаризација на ова множење и применливост на ДПО алгоритмот, воведена е нова континуирана променлива. Дополнително, и во трите оптимизациски методи има потреба од користење на математичката операција апсолутна вредност. Бидејќи истата не е диференцијабилна, изразот за апсолутна вредност е соодветно релаксиран со воведување на нова континуирана променлива.

Во пракса, најчесто ДМ се изведуваат само од два типа на водови со различен пресек поради стандардизирање на мрежите од исто напонско ниво. Со таквата стратегија се постигнува намалување на трошоците поради магацинско чување на помал број на различни типови на водови со различен пресек. Токму затоа, покрај тестирањето на оптимизацискиот метод за ОСПВ со примена на девет водови со различен пресек, извршена е и анализа со примена на два вода со различен пресек. Вкупните годишни трошоци добиени со користење на девет типови на водови со различен пресек се пониски во споредба со вкупните годишни трошоци со примена на два типови на водови со различен пресек. Причината за таквите резултатите лежи во предимензионирање на

некои гранки, со цел запазување на ограничувањата во моделот кои се однесуваат на загубите на напон во мрежата.

Со примена на оптимизацискиот метод за ОКРДМ се анализирани две сценарија: одредување на оптимална топологија на радијална ДМ од множество на гранки и одредување на оптимална топологија на радијална ДМ со рачно вклучување на две гранки во финалното решение. Целта на втората симулација е да се тестира можноста за примена на оптимизацискиот метод за ОКРДМ во услови на оптимално проширување на постојна радијална ДМ. Од добиените резултати може да се заклучи дека вкупните годишни трошоци се помали кога се прави интервенција во системската променлива со рачно вклучување на два вода во финалното решение. Но, тоа не значи дека таквото решение е пооптимално. Со рачно одбирање на две гранки во финалната конфигурација, се добива решение кое не е робусно во однос на најнеповолната распределба на оптоварувањата во мрежата. Бидејќи годишните трошоци за неиспорачана електрична енергија поради испад на некој вод и годишните трошоци поради технички загуби на електрична енергија во мрежата се пропорционални на вкупната активна моќност што се дистрибуира, вкупните годишни трошоци во решението добиено со рачно интервенирање во системската променлива се помали.

Во однос на употребениот математички апарат, оптимизацискиот метод за ОКРДМ-ОЛДБС е далеку покомплексен во однос на основниот оптимизациски метод за ОКРДМ. Причина за тоа е сведувањето на три-фазната РО во дво-фазна, со примена на ККТ условите. Дополнително, во оптимизацискиот метод за ОКРДМ-ОЛДБС постои можност за дефинирање на различни вредности за реактивната моќност за поедините јазли од мрежата. Сепак, од аспект на анализираниот проблем, оптимизацискиот метод за ОКРДМ-ОЛДБС претставува надополнување на оптимизацискиот метод за ОКРДМ.

Резултатите од сите извршени симулации укажуваат дека годишните трошоци добиени со моделирање на потрошувачката со соодветен интервал на несигурност, се поголеми во однос на годишните трошоци добиени при детерминистички моделирана потрошувачка. Дополнително, со зголемување на вредноста на буџетот на несигурност  $\Gamma$  доаѓа до зголемување на максималното дозволено оптоварување, а со тоа и до зголемување на вкупните годишни трошоци во мрежата. Таквиот резултат е очекуван. Сепак, робусното решение е поекономично доколку се земат предвид идните трошоци за зајакнување на мрежата поради непредвидливоста во зголемувањето на оптоварувањето.

Постојат неколку насоки за идни истражувања во рамки на научната област обработена во оваа докторска дисертација. Меѓу нив, најзначајни се:

- Моделот за одредување на дневните потреби за полнење на ЕВ е изработен со податоци од анкета за транспортните навики на луѓето. Анкетата е спроведена на територија на Соединетите Американски Држави. Спроведување на анкета за евидентирање на транспортните навики на граѓаните на Република Северна Македонија може да помогне во уточнување на моделот со цел утврдување на дневните потреби за полнење на ЕВ, согласно областа каде се планира изградба на радијална ДМ.
- Оптимизацискиот метод за ОКРДМ-ОЛДБС дава решение за оптимална топологија на радијална ДМ, како и оптимална локација и моќност на СБС во истата. Во однос на активната енергија, овој метод дава решение само за вкупниот енергетски капацитет кој е поставен во целокупната ДМ. Доколку е потребно да се добијат податоци за енергетскиот капацитет на поединечните СБС, потребно е да се развие метод кој ќе ги зема предвид

приликите во една ДМ за повеќе временски интервали во текот на подолг временски период (на пример часовни интервали во период од еден ден, месец или година). На тој начин, може да се постигне оптимално планирање на енергетскиот капацитет на поединечните СБС. Сепак, вреди да се напомене дека при развојот на таков оптимизациски метод, потребно е да се внимава при дефинирање на зависноста на несигурниот податок при преминот од временскиот интервал  $(t - 1)$  во временскиот интервал  $(t)$ .



## 9 РЕФЕРЕНЦИ

- [1] UN, "Adoption of the Paris Agreement," United Nations, New York, 2015.
- [2] Strategy & (part of Pwc) и Истражувачкиот центар за енергетика и одржлив развој на Македонската академија на науките и уметностите, "Стратегија за развој на енергетиката на Република Северна Македонија до 2040 година," Скопје, Македонија, 2018.
- [3] J. Antoun, M. E. Kabir, B. Moussa, R. Atallah и C. Assi, "Impact Analysis of Level 2 EV Chargers on Residential Power Distribution Grids," во%1 2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Setubai, Portugal, 2020.
- [4] S. Sachan, "Stochastic charging of electric vehicles in smart power distribution grids," Stochastic charging of electric vehicles in smart power distribution grids, том 40, pp. 91-100, 2018.
- [5] E. Valseira-Naranjo, A. Sumper, R. Villafafila-Robles и D. Martinez-Vicente, "Probabilistic Method to Assess the Impact of Charging of Electric Vehicles on Distribution Grids," Energies, том 5, pp. 1503-1531, 2012.
- [6] M. Acidapu и K. Sandhu, "A new approach of sizing battery energy storage system for smoothing the power fluctuations of a PV/wind hybrid system," International Journal of Energy Research , том 40, бр. 9, 2016.
- [7] B. Zeng, J. Wen, J. Shi, J. Zhang и Y. Zhang, "A multi-level approach to active distribution system planning for efficient renewable energy harvesting in a deregulated environment," Energy, том 96, бр. 1, pp. 614-624, 2016.
- [8] S. Santos, D. Fitiwi, M. Shafie-khah, A. Bizuayehu, C. Cabrita и J. Catalão, "New Multi-Stage and Stochastic Mathematical Model for Maximizing RES Hosting Capacity—Part II: Numerical Results," IEEE Transactions on Sustainable Energy, том 8, бр. 1, pp. 320-330, 2017.
- [9] G. Mokryani, "Active distribution networks planning with integration of demand response," Solar Energy , том 122, pp. 1362-1370, 2015.
- [10] B. Zeng, J. Zhang, Y. Zhang и X. Yang, "Active Distribution System Planning for Low-carbon Objective using Cuckoo Search Algorithm," Journal of Electrical Engineering and Technology, том 9, бр. 2, pp. 443-440, 2014.
- [11] K. Zou, A. P. Agalgaonkar, K. Muttaqi и S. Perera, "Distribution System Planning With Incorporating DG Reactive Capability and System Uncertainties," IEEE Transactions on Sustainable Energy, том 3, бр. 1, pp. 112-123, 2012.

- 
- [12] S. Karagiannopoulos, P. Aristidou и G. Hug, “Hybrid approach for planning and operating active distribution grids,” IET Generation, Transmission and Distribution, том 11, бр. 3, 2017.
- [13] H. Arasteh, M. S. Sepasian, V. Vahidinasab и P. Siano, “SoS-based multiobjective distribution system expansion planning,” Electric Power Systems Research, том 141, pp. 392-406, 2016.
- [14] M. Jooshaki, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghtaie и M. Lehtonen, “MILP Model of Electricity Distribution System Expansion Planning Considering Incentive Reliability Regulations,” IEEE Transactions on Power Systems, том 3, бр. 6, pp. 4300-4316, 2019.
- [15] M. Resener, S. Haffner, L. Pereira, P. Pardalos и M. Ramos, “A comprehensive MILP model for the expansion planning of power distribution systems – Part I: Problem formulation,” Electric Power Systems Research, том 170, pp. 378-384, 2019.
- [16] R. Gholizadeh-Roshanagh, K. Zare и M. Marzband, “An A-Posteriori Multi-Objective Optimization Method for MILP-Based Distribution Expansion Planning,” IEEE Access, pp. 60279-60292, 2020.
- [17] T. Belgin и A. Taylan, “Optimal Distribution Network Design Using Genetic Algorithms,” Electric Power Components and Systems, том 33, бр. 5, pp. 513-524, 2005.
- [18] J. Mendoza, M. López, H. Peña и D. Labra, “Low voltage distribution optimization: Site, quantity and size of distribution transformers,” Electric Power Systems Research, том 91, pp. 52-60, 2012.
- [19] M. S. Nazar и M. Haghifam, “Multiobjective electric distribution system expansion planning using hybrid energy hub concept,” Electric Power Systems Research, том 79, бр. 6, pp. 899-911, 2009.
- [20] A. Ben-Tal и A. Nemirovski, “Robust Convex Optimization,” Mathematics of Operations Research, том 23, бр. 4, pp. 769-1024, 1998.
- [21] M. I. Alizadeh, M. P. Moghaddam и N. Amjady, “Multistage Multiresolution Robust Unit Commitment With Nondeterministic Flexible Ramp Considering Load and Wind Variabilities,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, том 9, бр. 2, pp. 872 - 883, 2018.
- [22] A. Ben-Tal, A. Goryashko и A. Nemirovski, “Adjustable robust solutions of uncertain linear programs,” 2004, том 99, бр. 2, pp. 351-376, Mathematical programming.
- [23] B. Zeng и L. Zhao, “Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method,” Operations Research Letters, том 41, pp. 457-461, 2013.
- [24] D. P. Thunnissen, Propagating and Mitigating Uncertainty in the Design of Complex Multidisciplinary Systems, Ph.D. Dissertation ур., California : California Institute of Technology, 2005.

- 
- [25] S. Salomon, Active Robust Optimization: Optimizing for Robustness of Changeable Products, Springer, 2019.
- [26] H.-G. Beyer и B. Sendhoff, "Robust optimization – A comprehensive survey," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, том 196, бр. 33-34, pp. 3190-3218, 2007.
- [27] D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, J. Zhao и T. Zheng, "Adaptive Robust Optimization for the Security Constrained Unit Commitment Problem," IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, том 28, бр. 1, 2013.
- [28] S. Takriti, J. R. Birge и E. Long, "A stochastic model for the unit commitment problem," IEEE Transactions on Power Systems, том 11, бр. 3, pp. 1497 - 1508, 1996.
- [29] J. Morales, A. Conejo, H. Madsen, P. Pinson и M. Zugno, Integrating Renewables in Electricity Markets - Operational Problems, Springer, 2015.
- [30] L. Zhao и B. Zeng, "Robust unit commitment problem with demand response and wind energy," во%1 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA , 2012.
- [31] A. Nousedilis, A. Chrysochos, G. Papagiannis и G. Christoforidis, "The Impact of Photovoltaics Self-Consumption Rate on Voltage Levels in LV Distribution Grids," во%1 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Cadiz, Spain, 2017.
- [32] A. Nousedilisa, G. Christoforidisb и G. Papagiannisa, "Active power management in low voltage networks with high photovoltaics penetration based on prosumers' self-consumption," Applied Energy, pp. 614-624, 2018.
- [33] EU, "On the energy performance of buildings. Directive 2018/844/EU of the European Parliament and of the Council," Official Journal of the European Communities, 2018.
- [34] R. Garcia-Valle и P. Lopes, Electric vehicle integration into modern power networks, Springer, 2013.
- [35] Z. A. Kamaruzzaman, A. Mohamed и H. Shareef, "Effect of grid-connected photovoltaic systems on static and dynamic voltage stability with analysis techniques – a review," Przegląd Elektrotechniczny, том 91, бр. 6, pp. 134-138, 2015.
- [36] D. Fischer, A. Harbrecht, A. Surmann и R. McKenna, "Electric vehicles' impacts on residential electric local profiles – A stochastic modelling approach considering socio-economic, behavioural and spatial factors," Applied Energy, Томови %1 од %2233-234, pp. 644-658, 2019.
- [37] AFH, "2017 NHTS Data User Guide," Administration, Federal Highway, 2018.

- 
- [38] D. Zahra и F. Mehdi, "Plug-in Hybrid Electric Vehicles: Charging Load Profile Extraction Based on Transportation Data," во%1 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, 2011.
- [39] S. Shafiee, M. Fotuhi-Firuzabad и M. Rastegar, "Investigating the Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Power Distribution Systems," IEEE Transactions on Smart Grid , том 4, бр. 3, pp. 1351-1360, 2013.
- [40] L. Hui-ling, B. Xiao-min и T. Wen, "Impacts of plug-in hybrid electric vehicles charging on distribution grid and smart charging," во%1 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), Auckland, New Zealand , 2013.
- [41] "Standard EN50160: Voltage Characteristics in public Distribution Systems".
- [42] M. Suri, T. Huld, E. Dunlop и H. Ossenbrink, "Potential of Solar Electricity Generation in the European Union Member States and Candidate Countries," Solar Energy, бр. 81, pp. 1295-1305, 2007.
- [43] M. Thomson и D. Infield, "Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems," IET Renewable Power Generation, том 1, бр. 1, pp. 33-40, March 2007 .
- [44] "The IEEE European Low Voltage Test Feeder," IEEE PES Distribution Test Feeders, Feb 2015. [Мрежен]. Available: <http://sites.ieee.org/pes-testfeeders/>.
- [45] R. Zimmerman, C. Murillo-Sánchez и others, "Matpower," 2018. [Мрежен].
- [46] A. W. Funkhouser и R. P. Huber, "A Method for Determining Economical ACSR Conductor Sizes for Distribution Systems," Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems , том 74, бр. 3, pp. 479-484, 1955.
- [47] Z. Wang, H. Liu, D. Yu, X. Wang и H. Song, "A practical approach to the conductor size selection in planning radial distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, том 15, бр. 1, pp. 350-354, 2000.
- [48] S. Sivanagaraju, N. Sreenivasulu, M. Vijayakumar и T. Ramana, "Optimal conductor selection for radial distribution systems," Electric Power Systems Research, том 63, бр. 2, pp. 95-103, 2002.
- [49] J. Franco, M. Rider, M. Lavorato и R. Romero, "Optimal Conductor Size Selection and Reconductoring in Radial Distribution Systems Using a Mixed-Integer LP Approach," IEEE Transactions on Power Systems, том 28, бр. 1, pp. 10-20, 2012.
- [50] M. Thenepalle, "A Comparative Study on Optimal Conductor Selection for Radial Distribution Network using Conventional and Genetic Algorithm Approach," International Journal of Computer Applications , том 2, бр. 2, 2011.

- 
- [51] H. Samet и M. M. Legha, "Optimal Conductor Selection in Radial Distribution Using Imperialism Competitive Algorithm and Comparison with PSO Method," во%1 6th International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering (6th IC-SCCE), Athens - Greece, 2014.
- [52] A. Ben-Tal, L. E. Ghaoui и A. Nemirovski, Robust Optimization, New Jersey: Princeton Series in Applied Mathematics, 2009.
- [53] N. H. Pavlos Georgilakis, "A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research," Electric Power Systems Research, том 121, pp. 89-100, April, 2015.
- [54] M. T. H. A. M. I. A. M. M. B. H. R. S. K. M. M. S. S. Vahid Vahidinasab, "Overview of Electric Energy Distribution Networks Expansion Planning," IEEE Access, том 8, pp. 2169-3536, 2020.
- [55] Turan Gonen, Electric power distribution engineering, CEC Press, 2015.
- [56] W. W. Z. C. J. J. W. Z. Rui Li, "A Review of Optimal Planning Active Distribution System: Models, Methods, and Future Researches," Energies, том 10, 2017.
- [57] M. Asensio, P. M. d. Quevedo, G. Muñoz-Delgado и J. Contreras, "Joint Distribution Network and Renewable Energy Expansion Planning Considering Demand Response and Energy Storage—Part I: Stochastic Programming Model," IEEE Transactions on Smart Grid, том 9, бр. 2, pp. 655 - 666, 2016.
- [58] J. D. N. a. R. E. E. P. C. D. R. a. E. S. I. N. Results, "Miguel Asensio; Pilar Meneses de Quevedo; Gregorio Muñoz-Delgado; Javier Contreras," IEEE Transactions on Smart Grid , том 9, бр. 2, pp. 667 - 675, 2018.
- [59] M. Asensio, G. Muñoz-Delgado и J. Contreras, "Bi-Level Approach to Distribution Network and Renewable Energy Expansion Planning Considering Demand Response," IEEE Transactions on Power Systems, том 32, бр. 6, pp. 4298 - 4309, 2017.
- [60] G. Muñoz-Delgado, J. Contreras и J. M. Arroyo, "Joint Expansion Planning of Distributed Generation and Distribution Networks," IEEE Transactions on Power Systems, том 30, бр. 5, pp. 2579 - 2590, 2015.
- [61] A. Tabares, J. F. Franco, M. Lavorato и M. J. Rider, "Multistage Long-Term Expansion Planning of Electrical Distribution Systems Considering Multiple Alternatives," IEEE Transactions on Power Systems, том 31, бр. 3, pp. 1900 - 1914, 2016.
- [62] W. Yao, C. Y. Chung, F. Wen, M. Qin и Y. Xue, "Scenario-Based Comprehensive Expansion Planning for Distribution Systems Considering Integration of Plug-in Electric Vehicles," IEEE Transactions on Power Systems, том 31, бр. 1, pp. 317 - 328, 2016.
- [63] J. Aghaei, K. Muttaqi, A. Azizivahed и M. Gitizadeh, "Distribution expansion planning considering reliability and security of energy using

- 
- modified PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm,” *Energy*, том 65, pp. 398-411, 2014.
- [64] S. Ganguly, N. Chandra и D. Das, “Multi-objective planning of electrical distribution systems using dynamic programming,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, том 46, pp. 65-78, 2013.
- [65] N. Boulaxis и M. Papadopoulos, “Optimal feeder routing in distribution system planning using dynamic programming technique and GIS facilities,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Томови %1 од %2242 - 247, бр. 1, р. 17, 2002.
- [66] A. Samui, S. Singh, T. Ghose и S. R. Samantaray, “A Direct Approach to Optimal Feeder Routing for Radial Distribution System,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, том 27, бр. 1, pp. 253-260, 2012.
- [67] A. Zidan, M. Shaaban и E. El-Saadany, “Long-term multi-objective distribution network planning by DG allocation and feeders’ reconfiguration,” *Electric Power Systems Research*, том 105, pp. 95-104, 2013.
- [68] C. L. T. Borges и V. F. Martins, “Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and Distributed Generation uncertainties,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, том 36, бр. 1, pp. 107-116, 2012.
- [69] J. Benvindo и R. Pereira, “Multiobjective multistage distribution system planning using tabu search,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, том 8, бр. 1, pp. 35-45, 2014.
- [70] M. Sedghi, M. A. Golkar и M.-R. Haghifam, “Distribution network expansion considering distributed generation and storage units using modified PSO algorithm,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, том 52, pp. 221-230, 2013.
- [71] I. Ziari, G. Ledwich, A. Ghosh и G. Platt, “Optimal distribution network reinforcement considering load growth, line loss, and reliability,” *IEEE Transactions on Power Systems*, том 28, бр. 2, pp. 587-597, 2013.
- [72] J. Nahman и D. Peric, “Optimal Planning of Radial Distribution Networks by Simulated Annealing Technique,” *IEEE Transactions on Power Systems*, том 23, бр. 2, pp. 790 - 795, 2008.
- [73] A. Conejo, L. B. Morales, J. Kazempour и A. Siddiqui, *Investment in Electricity Generation and Transmission - Decision Making under Uncertainty*, Springer International Publishing, 2016.
- [74] M. Lavorato, J. Franco, M. Rider и R. Romero, “Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, том 27, бр. 1, pp. 172 - 180, 2012.
- [75] I. Alsaidan, W. Gao и A. Khodaei, “Distribution Network Expansion Through Optimally Sized and Placed Distributed Energy Storage,” во%1

---

2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Denver, CO, USA, 16-19 April 2018 .

- [76] K. Masteri, B. Venkatesh и W. Freitas, “A Feeder Investment Model for Distribution System Planning Including Battery Energy Storage,” Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, том 41, бр. 4, pp. 162 - 171, 19 December 2018.
- [77] S. Salee и P. Wirasanti, “Optimal siting and sizing of battery energy storage systems for grid-supporting in electrical distribution network,” во%1 2018 International ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI-NCON), Chiang Rai, Thailand , 25-28 February 2018 .
- [78] G. Carpinelli, F. Mottola, D. Proto и A. Russo, “Optimal allocation of dispersed generators, capacitors and distributed energy storage systems in distribution networks,” во%1 2010 Modern Electric Power Systems, Wroclaw, Poland , 2010 Modern Electric Power Systems.