

## VIŠEGODIŠNJE VIŠEKRITERIJUMSKO PLANIRANJE ZAMENE I REVITALIZACIJE KABLOVA U GRADSKIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

### A MULTI-YEAR MULTI-CRITERIA REPLACEMENT AND REJUVENATION PLANNING OF UNDERGROUND CABLES IN URBAN DISTRIBUTION NETWORKS

- i. Neven KOVAČKI, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Srbija
- ii. Željko POPOVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Srbija
- iii. Nikola MILOŠEVIĆ, Elektrodistribucija Srbije, Srbija

#### KRATAK SADRŽAJ

Ovaj rad predstavlja pristup za određivanje najboljeg višegodišnjeg plana poboljšanja pouzdanosti urbanih distributivnih mreža zamenom i revitalizacijom kablova uzimajući u obzir proširenja/promene mreže u planskom periodu. On određuje broj i lokacije kablova u mreži koje je potrebno zameniti ili obnoviti u svakoj godini razmatranog planskog perioda da bi se ispunio cilj donosioca odluka. Cilj koji se razmatra u ovom radu je postizanje željene ravnoteže između poboljšanja indeksa pouzdanosti (SAIFI, SAIDI, ASIDI) i troškova zamene i revitalizacije, uvažavajući budžetska ograničenja. Ovaj cilj se postiže primenom predloženog modela višekriterijumskog mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (MILP), kojim se u svakoj od razmatranih godina utvrđuje skup neinferiornih rešenja (planovi zamene i revitalizacije). Ovi planovi se zatim koriste u okviru predloženog algoritma više kriterijumskog dinamičko programiranje (MCDP) za generisanje skupa višegodišnjih planova i određivanje najboljeg višegodišnjeg plana zamene i revitalizacije kablova. Poređenje (rangiranje) planova u okviru predloženog MCDP se vrši korišćenjem višekriterijumske tehnike TOPSIS. Ova tehnika omogućava uvažavanje različitih preferencija donosioca odluka u pogledu nivoa poboljšanja indeksa pouzdanosti u mreži.

**Ključne reči:** poboljšanje pouzdanosti, revitalizacija, zamena, višekriterijumsko, višegodišnje.

#### ABSTRACT

This paper presents an approach for determining the best multi-year reliability improvement plan in urban distribution networks by cable replacement and rejuvenation considering network expansions/changes in the planning period. It determines the number and locations of cables in the network that need to be replaced or rejuvenated in each year of the considered planning period to fulfill a decision-maker's goal. The goal considered in this paper is to achieve the desired balance between the improvement of reliability indices (SAIFI, SAIDI, ASIDI) and the costs of replacement and rejuvenation, considering budgetary limitations. This goal is achieved by applying the proposed multi-criteria mixed-integer linear programming model, which determines a set of noninferior solutions (replacement and rejuvenation plans) in each of the considered years. These plans are then used within the proposed multi-criteria dynamic programming (MCDP) algorithm to generate a set of multi-year plans and determine the best multi-year cable replacement and rejuvenation plan. The comparison (ranking) of plans within the proposed MCDP is performed using a multiple-criteria decision making technique TOPSIS. This technique enables the consideration of different preferences of the decision maker regarding the levels of improvement of the reliability indices in the network.

**Key words:** reliability improvement, rejuvenation, replacement, multi-criteria, multi-year.

**Kontakt informacije:** Neven Kovački (kovaackin@uns.ac.rs), Željko Popović (zpopovic@uns.ac.rs), Nikola Milošević (nikola.milosevic@eds.rs)

#### Nomenklatura

$CRP(t)$ ,  $CRJ(t)$  – promenljiva koja opisuje trošak zamene i revitalizacije kablova u godini ( $t$ ), respektivno,  
 $C_{zamena}(f, i)$ ,  $C_{revital}(f, i)$  – trošak zamene i revitalizacije sekcije ( $i$ ) na fideru ( $f$ ), respektivno,

$d, L(f, i)$  – diskontna stopa i dužina sekcije ( $i$ ) na fideru ( $f$ ), respektivno,  
 $LDG_{sys}(t)$  – ukupna snaga u sistemu u godini ( $t$ ),  
 $LDG(f, j, i, t)$  – priključena snaga u čvoru ( $j$ ) na fideru ( $f$ ) pogođena kvarom ( $i$ ) u godini ( $t$ ),  
 $N_{\Sigma con}(t)$  – ukupan broj korisnika u sistemu u godini ( $t$ ),  
 $N(f, j, i, t)$  – broj korisnika u čvoru ( $j$ ) na fideru ( $f$ ) pogođenih kvarom ( $i$ ) u godini ( $t$ ),  
 $NF(t)$  – skup svih fidera u mreži u godini ( $t$ ),  
 $NC_f(t)$  – skup kvarova na fideru ( $f$ ) u godini ( $t$ ),  
 $NLPR_f(t)$  – skup čvorova sa priključenim korisnicima na fideru ( $f$ ) u godini ( $t$ ),  
 $SAIDI(t), SAIFI(t), ASIDI(t)$  – promenljive koje predstavljaju odgovarajuće indekse pouzdanosti u godini ( $t$ ),  
 $Tliz(i, t)$  – trajanje lokalizacije i izolacije kvara ( $i$ ) u godini ( $t$ ),  
 $Tres(j, i, t)$  – trajanje restauracije čvora ( $j$ ) nakon kvara ( $i$ ) u godini ( $t$ ). Ako ne postoji mogućnost da se restaurira napajanje čvora ( $j$ ) preko susednih fidera, trajanje retsuracije postaje jednako trajanju popravke kvara  $Trepair(i)$ ,  
 $z(f, i, t)$  – binarana promenljiva koja uzima vrednost 1 ako je kabal ( $i$ ) zamenjen novim kablom u godini ( $t$ ) i 0 u suprotnom,  
 $zrj(f, i, t)$  – binarana promenljiva koja uzima vrednost 1 ako je kabal ( $i$ ) revitalizovan u godini ( $t$ ) a 0 u suprotnom.  
 $\lambda(f, i, t), \lambda_{zam}(f, i), \lambda_{rev}(f, i)$  – ustaljeni intezitet otkaza postojeće sekcije ( $i$ ) u godini ( $t$ ) na fideru ( $f$ ), ustaljeni intezitet otkaza novog (zamenjenog) kabla ( $i$ ), i ustaljeni intezitet otkaza revitalizovanog kabla ( $i$ ) na fideru ( $f$ ), respektivno.

## 1. UVOD

Pouzdanost distributivnog sistema je od suštinskog značaja za zadovoljstvo kupaca. Stoga je poboljšanje pouzdanosti napajanja jedan od glavnih problemima sa kojima se suočavaju operatori distributivnog sistema (DSO) i jedan od glavnih pokretača različitih poboljšanja u distributivnim mrežama. Najčešći pristupi za poboljšanje pouzdanosti mreže su smanjenje broja kvarova, smanjenje trajanja prekida i smanjenje broja pogođenih kupaca [1], [2]. Smanjenje broja kvarova obično se postiže smanjenjem stope otkaza elemenata mreže. U urbanim distributivnim mrežama to se može postići zamenom i revitalizacijom starih podzemnih kablova. Različiti aspekti zamene i revitalizacije distributivnih kablova su proučavani u [3]-[10]. U [3]-[6] planiranje zamene i revitalizacije elemenata je vršeno na individualnoj osnovi bez razmatranja sistemskih aspekata. Određivanje optimalnog vremena zamene za pojedinačnu deonicu kabla, na osnovu troškova prekida (kvara) i cene zamene, predloženo je u [3]. Planiranje zamene i revitalizacije pojedinačnih kablovskih deonica je predloženo u [4]. Ovaj pristup uzima u obzir troškove prekida i troškove ulaganja kako bi se dobio najbolji plan zamene i revitalizacije primenom predloženog algoritma dinamičkog programiranja. U [5] je predložena strategija zamene zasnovana na merenju dielektričnih gubitaka i kapacitivnosti u kablovima. Prema predloženom pristupu, zamenjeni su najteže degradirani kablovi. U [6] rang lista pojedinih sekcija kablova je formirana na osnovu predloženog kriterijuma pouzdanosti (ponderisani kvarovi na 160 km kablova). Zatim se zamenjuju sve deonice kablova koje su u okviru raspoloživog budžeta. Sistemski aspekti su razmatrani u [7]-[10]. U [7] je predložen proaktivni program zamene kablova koji ima za cilj da zameni delove kablova sa najvećom stopom otkaza u svakom od razmatranih scenarija zamene (scenario od 150 milja/godišnje, scenario od 415 milja/godišnje i scenario 715 milja/ godine). U [8] i [9] predložena je statička metoda određivanja prioriteta za zamenu starih kablova uzimajući u obzir cenu penala (stimulacija) vezanih za indekse pouzdanosti SAIFI i SAIDI. U [10] je predloženo planiranje zamene energetskih transformatora u prenosnim mrežama koje zamenjuje komponente jednu za drugom počevši od vrha rangiranja komponenti na osnovu predložene mere kritičnosti i cene neisporučene energije. Međutim, svi predloženi pristupi planiranju zamene elemenata su statički. Pošto ne uzimaju u obzir više godina, promene u mreži koje se dešavaju u različitim godinama u budućnosti (npr. različite konfiguracije, novi delovi mreže i novi korisnici) ne mogu se uzeti u obzir. Iako su višegodišnji problemi složeniji i teži za formulisanje, oni daju konzistentnija i efektivnija rešenja (planove). Dalje, predloženi sistemski pristupi uzimaju u obzir samo strategiju zamene kablova i ne uzimaju u obzir moguća budžetska ograničenja. Konačno, oni koriste koncept donošenja odluka po jednom kriterijumu koji se ne može primeniti za donošenje odluka u kompanijama gde se različiti indeksi pouzdanosti (npr. SAIFI, SAIDI, ASIDI) koriste za kvantifikaciju pouzdanosti sistema [11], [12].

Ovaj rad predlaže višekriterijumski pristup za određivanje najboljeg višegodišnjeg plana zamene i revitalizacije kablova u urbanim distributivnim mrežama gde se za merenje pouzdanosti koriste indeksi pouzdanosti SAIFI, SAIDI, i ASIDI. Predloženi pristup predstavlja višegodišnji problem kao ponderisani graf gde različiti čvorovi predstavljaju različite planove zamene i revitalizacije u jednoj godini i gde lukovi povezuju čvor u jednoj godini sa čvorovima u narednoj godini. Sa lukovima su povezani prelazni troškovi (ponderi) koji predstavljaju trošak prelaska od čvora u prethodnoj godini do čvora u narednoj godini. Različiti planovi zamene i revitalizacije u jednoj godini se dobijaju primenom predloženog modela višekriterijumskog mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (MILP). On uzima u obzir troškove zamene i revitalizacije kablova i indekse pouzdanosti SAIFI, SAIDI i ASIDI. Predloženi MILP model omogućava dobijanje skupa neinferiornih rešenja (planova) u svakoj godini uzimajući u obzir stanje mreže (raspored fidera, broj korisnika, rast opterećenja) u posmatranoj godini. Ti

planovi se koriste za generisanje brojnih višegodišnjih planova zamene i revitalizacije u okviru predloženog algoritma višekriterijumskog dinamičkog programiranja. Najbolji među njima se dobija primenom predloženog algoritma dinamičkog programiranja i tehnike višekriterijumske odlučivanja TOPSIS.

## 2. FORMULACIJA PROBLEMA

Cilj višegodišnjeg planiranja zamene i revitalizacije kablova u urbanim distributivnim mrežama može se formulisati na sledeći način: odrediti skup poboljšanja (zamena i revitalizacije) u svakoj godini tako da se ispuni cilj donosioca odluke u razmatranom periodu planiranja. Ovde je cilj izražen u novčanim jedinicama (trošak ulaganja) i indeksima pouzdanosti. Indeksi pouzdanosti SAIDI i SAIFI, koji se zasnivaju na broju pogođenih kupaca, često se koriste u distributivnim kompanijama [11], [12]. Međutim, za merenje pouzdanosti u oblastima sa industrijskim i komercijalnim potrošačima, koje imaju relativno velike koncentracije opterećenja, indeksi zasnovani na opterećenju bi bili poželjniji [1]. Zbog toga je u radu razmatran i indeks pouzdanosti ASIDI. Dakle, višekriterijumska formulacija višegodišnjeg planiranja zamene i revitalizacije kablova u urbanim distributivnim mrežama može se izraziti na sledeći način:

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^T \left( SAIDI(t), SAIFI(t), ASIDI(t), \frac{CINV(t)}{(1+d)^t} \right) \right\} \quad (1)$$

$$CINV(t) = CRP(t) + CRJ(t) \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T \frac{CINV(t)}{(1+d)^t} \leq \text{Budžet} \quad (3)$$

Sa  $CINV(t)$  je označen ukupni trošak ulaganja u godini ( $t$ ). Ograničenje budžeta, koje ograničava količinu novca dostupnog za poboljšanja mreže, opisano je sa (3).

## 3. PRISTUP ZA VIŠEGODIŠNJE VIŠEKRIERIJUMSKO PLANIRANJE ZAMENE I REVITALIZACIJE KABLOVA U URBANIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

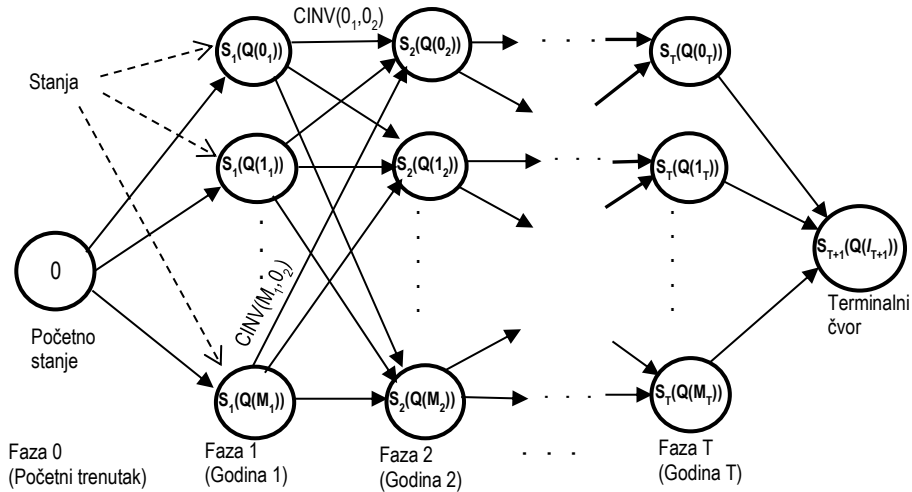
Problem višegodišnjeg planiranja zamene i revitalizacije kablova predstavljen je usmerenim ponderisanim grafom gde čvorovi predstavljaju različite planove zamene i revitalizacije mreže u razmatranoj godini i svaka godina predstavlja fazu, kao što je opisano u odeljku 3.1. Različiti planovi statičke zamene i revitalizacije u jednoj godini (fazi) dobijaju se primenom procedure prikazane u odeljku 3.2. Dobijeni planovi omogućavaju kreiranje većeg broja višegodišnjih planova, a cilj je da se u ponderisanom grafu pronađe put koji vodi do optimalnog (najboljeg) rešenja, odnosno do optimalnog višegodišnjeg plana zamene i revitalizacije. Ovaj put se dobija primenom pristupa višekriterijumskog dinamičkog programiranja predloženog u odeljku 3.1.

### 3.1 Formulacija višegodišnjeg problema zamene i revitalizacije kablova u terminima višekriterijumskog dinamičkog programiranja

Višegodišnji problem planiranja zamene i revitalizacije predstavljen je usmerenim ponderisanim grafom prikazanim na slici 1. Svaki čvor na slici 1 predstavlja statičko stanje mreže dok svaka godina predstavlja fazu. Trošak prelaska ( $CINV(i_t, l_{t+1})$ ) iz čvora (stanje)  $i_t$  u fazi (godini)  $t$  u čvor (stanje)  $l_{t+1}$  u fazi (godini)  $t+1$  sastoji se od troškova revitalizacije ( $CRJ(\cdot)$ ) i cene zamene ( $CRP(\cdot)$ ) da bi se dostiglo stanje  $l_{t+1}$ .

Prelazak iz stanja  $i_t$  u stanje  $l_{t+1}$  je dozvoljen samo ako je skup poboljšanja (zamena/ revitalizacija) u stanju  $i_t$  podskup skupa poboljšanja u stanju  $l_{t+1}$ . Svaka putanja na grafu koja počinje u početnom stanju (čvoru) i završava na (veštačkom) terminalnom čvoru predstavlja višegodišnji plan zamene i revitalizacije. Višegodišnji plan sabira sadašnju vrednost (PW) investicionih troškova i vrednosti indeksa pouzdanosti (SAIFI, SAIDI, ASIDI) u svakoj fazi (godini). Ako zbir sadašnjih vrednosti investicionih troškova u bilo kojoj fazi višegodišnjeg plana postane veći od ograničenja budžeta, ovaj plan se dalje ne razmatra u proračunima.

Višekriterijumski aspekt problema razmatran je korišćenjem proširenja principa optimalnosti na višekriterijumski kontekst predložen u [13]. Shodno tome, definisan je neinferiorni vektor kriterijuma stanja  $\mathbf{S}_t(i_t) = \{S_t^k(i_t)\}$  koji predstavlja zbir odgovarajućih kriterijuma ( $k=1, \dots, K$ ) nastalih pri kretanju iz stanja ( $i_t$ ) tačno  $t$  veza (godina) od početka (prve godine).  $\mathbf{Q}(i_t)$  označava skup svih neinferiornih vektora kriterijuma stanja u čvoru  $i_t$ . Vektor kriterijuma stanja  $\mathbf{S}'_t(i_t)$  je inferioran u odnosu na  $\mathbf{S}_t(i_t) = \{S_t^k(i_t)\}$  ako je  $\mathbf{S}_t(i_t) \leq \mathbf{S}'_t(i_t)$  sa strogom nejednakošću



**Slika 1.** Grafovski prikaz višegodišnjeg višekriterijuskog problema planiranja zamene i revitalizacije

koja važi za najmanje jedan kriterijum, odnosno za najmanje jedan  $k$ . Koristeći ove definicije,  $S_t(i_t)$ ,  $t = 1, 2, \dots, T+1$ , se rekursivno određuje na sledeći način:

$$S_t(i_t) = \{(CINV(j_{t-1}, i_t), SAIFI(i_t), SAIDI(i_t), ASIDI(i_t)) + S_{t-1}(j_{t-1})\}, \text{ za } \forall j_{t-1} \in I_{t-1}^{i_t} \wedge S_{t-1}(j_{t-1}) \in Q(j_{t-1}) \quad (4)$$

$$S_{t-1}(j_{t-1}) = ((^{(t-1)}CINV(j_{t-1}), ^{(t-1)}SAIFI(j_{t-1}), ^{(t-1)}SAIDI(j_{t-1}), ^{(t-1)}ASIDI(j_{t-1})), S_{t-1}(j_{t-1}) \in Q(j_{t-1}) \quad (5)$$

$$^{(t-1)}CINV(j_{t-1}) \leq \text{Budžet}, \quad (6)$$

gde je  $S_0(j_0) = \mathbf{0} = (0,0,0,0)$  i  $CINV(i_T, l_{T+1}) = 0$ .

Ovde  $^{(t-1)}CINV(j_{t-1})$  predstavlja (kumulativni) trošak zamene/revitalizacije da bi se dostiglo stanje  $j_{t-1}$  u godini (fazi)  $t-1$ .  $^{(t-1)}CINV(j_{t-1})$ ,  $^{(t-1)}SAIFI(j_{t-1})$ ,  $^{(t-1)}SAIDI(j_{t-1})$  i  $^{(t-1)}ASIDI(j_{t-1})$  predstavljaju (kumulativne) vrednosti indeksa pouzdanosti u stanje  $j_{t-1}$  tačno  $(t-1)$  godine od početka.  $SAIFI(i_t)$ ,  $SAIDI(i_t)$ , i  $ASIDI(i_t)$  predstavljaju vrednosti indeksa pouzdanosti u stanju u godini (fazi)  $(t)$ .  $I_{t-1}^{i_t}$  označava skup čvorova u fazi  $(t-1)$  koji su povezani sa čvorom  $(i)$  u fazi  $(t)$ . Jednačina (6) se koristi za proveru budžetskog ograničenja u vektorima kriterijuma stanja u stanju  $(j_{t-1})$ . Vektori kriterijuma stanja u kojima je narušeno budžetsko ograničenje se ne razmatraju u daljim proračunima.

Optimalno, neinferiorno višekriterijusko rešenje odgovara, dakle, jednom od vektora stanja razmatranih u fazi  $(T+1)$ . Rezultujući višekriterijuski algoritam dinamičkog programiranja se sastoji od sledećih koraka:

0)  $t=1$

1) Izračunati sve vektore kriterijuma stanja  $S_t(i_t) \in Q(i_t)$  za sve  $i_t$  koristeći (4).

2) Ako je  $t \leq T$ , postavi  $t = t + 1$  i vrati se na 1); u suprotnom idi na 3).

3) Rangirajte (uporedite) vektore kriterijuma stanja u fazi  $T+1$  koristeći TOPSIS tehniku [14]. Rangiranje se vrši na sledeći način [14]:

3a) Izračunajte normalizovane ocene ( $d_{kj}$ ) koristeći (7),

$$d_{kj} = \frac{f_{kj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^J f_{kj}^2}}, \quad k = 1, \dots, K, \quad j = 1, \dots, J, \quad (7)$$

gde je  $f_{kj}$  vrednost  $k$ -tog kriterijuma u  $j$ -tom višegodišnjem planu zamene i revitalizacije.

3b) Izračunajte ponderisane normalizovane ocene za svaku normalizovanu ocenu prema (8),

$$v_{kj} = w_k d_{kj}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, J, \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K w_k = 1, \quad (9)$$

gde su  $w_k$  ( $k \in \{CINV, SAIDI, SAIFI, ASIDI\}$ ) faktori težine koji opisuju preferencije donosioca odluka u vezi sa svakim od razmatranih kriterijuma.

3c) Odredite idealno ( $A^*$ ) i anti-idealno ( $A^-$ ) rešenje za skup vektora kriterijuma stanja iz koraka 3b) korišćenjem (10) i (11),

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_i^*, \dots, v_n^*\} = \min_j v_{kj}, \quad j = 1, \dots, J, \quad (10)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_i^-, \dots, v_n^-\} = \max_j v_{kj}, \quad j = 1, \dots, J. \quad (11)$$

3d) Izračunajte meru razdvajanja između svake alternative (ponderisana normalizovana ocena iz koraka 3b) i idealnog ( $R_j^*$ ) i anti-idealnog ( $R_j^-$ ) rešenja koristeći  $n$ -dimenzionalno Euklidsko rastojanje kao što je dato u (12) i (13),

$$R_j^* = \sqrt{\sum_{k=1}^K [v_{kj} - v_k^*]^2}, \quad j = 1, \dots, J, \quad (12)$$

$$R_j^- = \sqrt{\sum_{k=1}^k [v_{kj} - v_k^-]^2}, \quad j = 1, \dots, J. \quad (13)$$

3e) Izračunajte relativnu bliskost ( $C_j^*$ ) idealnom rešenju za svaku alternativu pomoću (14),

$$C_j^* = R_j^- / (R_j^* + R_j^-), \quad j = 1, \dots, J. \quad (14)$$

3f) Izaberite alternativu sa najvećom vrednošću relativne bliskosti  $C_j^*$ . Odnosno, izabrati najbolje (optimalno) rešenje (vektor kriterijuma stanja).

Treba naglasiti da kada se dobije optimalni vektor kriterijuma stanja u terminalnoj fazi (T+1), kako je definisano u koraku 3), implicitno generisanje vektora optimalnog kriterijuma stanja u svakoj drugoj fazi je jednostavno [13]. Predloženi pristup višekriterijumskom dinamičkom programiranju (MCDP) pretpostavlja da je zavisnost između stopa otkaza i starosti podzemnih kablova opisana na sledeći način [4], [15], [16]: stopa otkaza ostaje konstantna tokom perioda nakon ugradnje i period stabilnog stanja ( $T_{bo}$ ), a zatim se povećava tokom perioda intezivnog starenja koji odražava efekat starenja. U ovom radu je za opisivanje zavisnosti između stopa otkaza i starosti podzemnih kablova korišćen linearni model, predložen u [15], [16]. U [15] je pokazano da je model koji je linearan po segmentima praktično identičan eksponencijalnim modelima kada se oni koriste za uklapanje u empirijske podatke o stopi otkaza. Model je formulisan na sledeći način:

$$\lambda(f, i, t) = \lambda_{zam(rev)}(f, i) + \max\{0, m_{bo} \cdot (t - T_{bo})\} \quad (15)$$

gde je  $\lambda_{zam(rev)}(f, i)$  stopa otkaza u stabilnom stanju zamenjenog (revitalizovanog) kabla ( $i$ ) na fideru ( $f$ ),  $T_{bo}$  je starost u kojoj počinje intezivno starenje, a  $m_{bo}$  je stopa intezivnog starenja.

Da bi se smanjila složenost predloženog MCDP pristupa za realne dimenzije problema, broj neinferiornih rešenja u svakom čvoru u fazi, odnosno maksimalna veličina skupa  $\mathbf{Q}(i)$ , je definisan/ograničen na sledeći način: maksimalni broj najbolje rangiranih neinferiornih rešenja koja se razmatraju u svakom čvoru je postepeno povećavan sve dok dalje povećanje ne dovodi do poboljšanja kvaliteta rešenja. Predloženi pristup je razmatran u odeljku 4.

Dobijanje skupa stanja (čvorova), odnosno skupa planova zamene i revitalizacije u svakoj fazi na grafu sa slike 1 je opisano u odeljku 3.2.

### 3.2 Procedura za dobijanje skupa statičkih planova zamene i revitalizacije

Procedura za dobijanje skupa planova zamene i revitalizacije u svakoj fazi grafa sa slike 1 koristi koncept popunjavanja unapred, opisan u odeljku 3.2.2, i statički višekriterijumski MILP model opisan u odeljku 3.2.1.

**3.2.1 Višekriterijumski model mešovito celobrojnog lineranog programiranja.** U svakoj godni (fazi) definisan je problem planiranja statičke zamene i revitalizacije. Ovaj problem, formulisan kao višekriterijumski MILP problem sa ograničenjima u ciljnoj funkciji [17], definisan je na sledeći način.

$$\min\{CINV(t)=CRP(t) + CRJ(t)\} \quad (16)$$

a) trošak zamene i revitalizacije

$$CRP(t) = \sum_{f \in NF(t)} \sum_{i \in NC_f(t)} z(f, i, t) \cdot C_{zamene}(f, i) \quad (17)$$

$$CRJ(t) = \sum_{f \in NF(t)} \sum_{i \in NC_f(t)} zrj(f, i, t) \cdot C_{revital}(f, i) \quad (18)$$

Sa (17) je opisan trošak zamene postojećih elemenata mreže novim elementima sa nižim stopama otkaza, dok je trošak revitalizacije opisan sa (18). Efekti zamene i revitalizacije na stope otkaza opisani su u (19) i (20).

$$\Lambda(f, i, t) = (1 - z(f, i, t) - zrj(f, i, t)) \cdot \lambda(f, i, t) + z(f, i, t) \cdot \lambda_{zam}(f, i) + zrj(f, i, t) \cdot \lambda_{rev}(f, i) \quad (19)$$

$$z(f, i, t) + zrj(f, i, t) \leq 1 \quad (20)$$

b) ograničenja u ciljnoj funkciji

$$SAIDI(t) \leq SAIDI_{min}(t) + \alpha_{SD} \cdot (SAIDI_{max}(t) - SAIDI_{min}(t)), \alpha_{SD} \in [0,1] \quad (21)$$

$$SAIFI(t) \leq SAIFI_{min}(t) + \alpha_{SF} \cdot (SAIFI_{max}(t) - SAIFI_{min}(t)), \alpha_{SF} \in [0,1] \quad (22)$$

$$ASIDI(t) \leq ASIDI_{min}(t) + \alpha_{AS} \cdot (ASIDI_{max}(t) - ASIDI_{min}(t)), \alpha_{AS} \in [0,1] \quad (23)$$

$SAIDI_{max}(t)$ ,  $SAIFI_{max}(t)$ ,  $ASIDI_{max}(t)$  u (21)-(23) su indeksi pouzdanosti koji postoje u početnoj (originalnoj) mreži u razmatranoj godini ( $t$ ).  $SAIDI_{min}(t)$ ,  $SAIFI_{min}(t)$  i  $ASIDI_{min}(t)$  predstavljaju minimalne vrednosti indeksa pouzdanosti koje se dobijaju rešavanjem (16)-(28) kada se funkcija cilja oblika  $\min SAIDI$ ,  $\min SAIFI$  i  $\min ASIDI$  koristi, respektivno, umesto funkcije cilja (16). U svakom od ovih slučajeva, ograničenja u ciljnoj funkciji (21)-(23) nisu relevantna i stoga se ne razmatraju.

c) Indeksi pouzdanosti

$$SAIDI(t) = \frac{1}{N_{\Sigma con}(t)} \cdot \sum_{f \in NF(t)} \sum_{i \in NC_f(t)} \sum_{j \in NLPR_f(t)} N(f, j, i, t) \cdot \Lambda(f, i, t) \cdot L(f, i) \cdot Tint(f, i, j, t) \quad (24)$$

$$SAIFI(t) = \frac{1}{N_{\Sigma con}(t)} \cdot \sum_{f \in NF(t)} \sum_{i \in NC_f(t)} \sum_{j \in NLPR_f(t)} \Lambda(f, i, t) \cdot L(i, f) \cdot N(f, j, i, t) \quad (25)$$

$$ASIDI(t) = \frac{1}{LDG_{sys}(t)} \cdot \sum_{f \in NF(t)} \sum_{i \in NC_f(t)} \sum_{j \in NLPR_f(t)} \Lambda(f, i, t) \cdot L(i, f) \cdot Tint(f, i, j, t) \cdot LDG(f, j, i, t) \quad (26)$$

$$Tint(f, i, j, t) = \begin{cases} Tlis(i, t), & \text{ako je čvor } (j) \text{ ispred kvara } (i) \\ Tlis(i, t) + Tres(j, i, t), & \text{ako je čvor } (j) \text{ iza kvara } (i) \\ Tlis(i, t) + Trepair(i), & \text{ako se čvor } (j) \text{ napaja nako popravke kvara } (i) \end{cases} \quad (27)$$

Jednačine (24)-(27) opisuju izračunavanje razmatranih indeksa pouzdanosti u godini ( $t$ ) [1].

d) *Ograničenja budžeta*

$$CRP(t) + CRJ(t) \leq \text{Budžet}$$

(28)

Jednačina (28) osigurava da je budžetsko ograničenje zadovoljeno.

Treba imati na umu da parametarska varijacija vrednosti  $\alpha_{SD}$ ,  $\alpha_{SF}$  i  $\alpha_{AS}$  u (21)-(23) omogućava generisanje skupa neinferiornih rešenja (planova zamene i revitalizacije) u razmatranoj godini [17]. Dobijanje skupa planova razmatranih u svakoj godini (fazi) u grafu na slici 1 je opisano u nastavku.

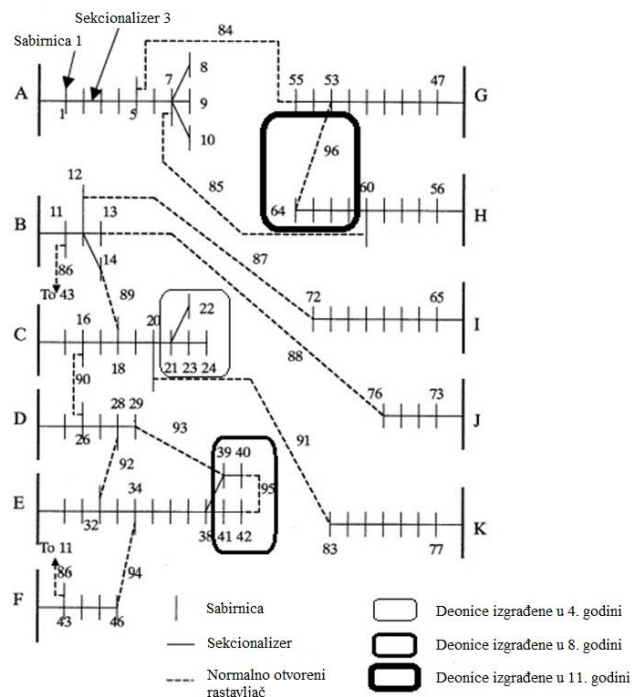
**3.2.2 Procedura popunjavanja unapred.** Skup planova zamene i revitalizacije koji se razmatraju u svakoj godini se dobija primenom koncepta popunjavanja unapred, koji se koristi u višegodišnjem planiranju proširenja mreže [18]. Procedura za dobijanje skupa rešenja je sledeća:

- 1) Izaberite kombinaciju parametara  $\alpha_{SD}$ ,  $\alpha_{SF}$  i  $\alpha_{AS}$  u (16)-(28).
- 2) U godini ( $t$ ) rešiti model (16)-(28) za izabranu kombinaciju parametara  $\alpha_{SD}$ ,  $\alpha_{SF}$  i  $\alpha_{AS}$  uzimajući u obzir poboljšanja (zamene i revitalizacije) primenjena u prethodnoj godini (godina ( $t-1$ )).
- 3) Ponovite korak 2) u svakoj godini ( $t$ ) ( $t=1, 2, 3, \dots, T$ ) za razmatranu kombinaciju parametara  $\alpha_{SD}$ ,  $\alpha_{SF}$  i  $\alpha_{AS}$ .
- 4) Ponavljajte korake 1)-3) dok sve kombinacije parametara  $\alpha_{SD}$ ,  $\alpha_{SF}$  i  $\alpha_{AS}$  ne budu iscrpljene.

Primenom predloženog postupka generiše se mnogo različitih statičkih rešenja. Sva ta rešenja čine skup rešenja (čvorova) koji se razmatra u svakoj godini na slici 1. Na ovaj način je omogućeno kreiranje i evaluacija velikog broja višegodišnjih planova zamene i revitalizacije u predloženom modelu dinamičkog programiranja, čime se obezbeđuje nalaženje kvalitetnog rešenje.

#### 4. PRIMER PRIMENE

Predloženi pristup je primenjen na distributivnoj mreži prikazanoj na slici 2 [19]. Ona se sastoji se od 94 čvora i 96 grane. Dužina grana, u miljama, i njihova starost prikazani su u tabeli 1. Svi ostali podaci o mreži su preuzeti iz [19]. Pretpostavlja se da potrošači pripadaju sledećim tipovima: domaćinstva, komercijalni i industrijski, sa vršnim



Slika 2 – Test mreža

opterećenjem datim u [19]. Pretpostavlja se da se čvor sa vršnim opterećenjem manjim od 200 kW čine domaćinstva, a njihov broj je jednak vršnom opterećenju (npr. ako je vršno opterećenje 100 kW, u čvoru je 100 domaćinstava). Takođe se pretpostavlja da se opterećenja domaćinstava povećavaju za 1% godišnje. Čvorove čije je opterećenje između 200 kW i 400 kW čine komercijalni kupci, dok čvorove čije je opterećenje veće od 400 kW čine industrijski kupci. U svakom od tih čvorova je povezan po jedan komercijalni ili industrijski kupac. Pretpostavlja se da se komercijalna opterećenja povećavaju za 0,8% godišnje, a industrijska za 0,5% godišnje. Razmatrani period planiranja je 15 godina, diskontna stopa je 5%, a raspoloživi budžet za zamenu i revitalizacije

kablova je 1,000,000 \$. Struktura mreže se menja u okviru planskog perioda, kao što je prikazano na slici 2. Grane 21, 22, 23, 24 i odgovarajući čvorovi se javljaju u 4. godini planskog perioda, grane 39, 40, 41, 42, 93, 95 se javljaju u 8. godini, a grane 61, 62, 63, 64, 96 se javljaju u 11. godini. Stopa otkaza grane se izračunava pomoću jednačine (15) i sledećih podataka: stopa otkaza u stabilnom stanju zamenjenog kabla je  $\lambda_{zam}(\cdot)=0.008$  [kvarova/milja/godina], stopa otkaza u stabilnom stanju revitalizovanog kabla je  $\lambda_{rev}(\cdot)=0.01$ ,  $T_{bo}$  je 20 godina, a  $m_{bo}$  je 0.02.

Pretpostavlja se i sledeće: cena zamene kabla je 40,000 \$/milja, cena pomlađivanja je 26,000 \$/milja, trajanje lokalizacije i izolacije kvara je 1.25 sati, trajanje restauracije napajanja je 0.75 sati, a trajanje popravke kvara je 2 sata u svakoj godini. Gore navedena trajanja su ista za svaki kvar i ostaju ista u svakoj godini. Vrednosti navedenih ulaznih parametara birana su na osnovu iskustva autora i podataka iz [15], [16]. Takođe se pretpostavlja da se opterećenje svakog fidera može preneti na susedni fider bez narušavanja bilo kakvog operativnog (termičkog i naponskog) ograničenja. Parametri  $\alpha_{SD}$ ,  $\alpha_{SF}$  i  $\alpha_{AS}$  se variraju u opsegu [0,1] u koracima od 0.0625. Na ovaj način se u svakoj godini izvršilo 4,096 (16x16x16) MILP proračuna (16)-(28) i dobijena su 8,632 različita statička rešenja (plana). Ova rešenja predstavljaju čvorove (stanja) koji se razmatraju u svakoj fazi (godini) na grafu prikazanom na slici 1. Treba imati na umu da parametre  $\alpha_{SD}$ ,  $\alpha_{SF}$  i  $\alpha_{AS}$  treba izabrati tako da se omogući dobijanje adekvatnog broja neinferiornih statičkih rešenja (planovi zamene i revitalizacije).

Razmatra se šest višegodišnjih planova zamene i revitalizacije, označenih sa P1-P6, a dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 2. Tabela 2 prikazuje kumulativne vrednosti indeksa pouzdanosti i sadašnje vrednosti troškova za planove P1-P6. Pored toga, kumulativne vrednosti indeksa pouzdanosti se prikazuju kada se zamena i revitalizacija kablova ne vrše u mreži (opcija „ne radi ništa“).

U planovima P1-P3 se pretpostavlja da su težinski faktori u (8) sledeći:  $w_{CINV}=0.25$ ,  $w_{SAIDI}=w_{SAIDI}=w_{SIDI}=0.25$ . Na ovaj način se opisuje donosilac odluka koji vrednuje poboljšanje pouzdanosti više od troškova.

Plan P1 se dobija razmatranjem samo najbolje rangiranog neinferiornog rešenja, prema TOPSIS tehnici, u svakom čvoru na grafu na slici 1. Plan P2 se dobija razmatranjem deset (10) najbolje rangiranih neinferiornih rešenja, dok je P3 dobijen razmatranjem sto (100) najbolje rangiranih neinferiornih rešenja u svakom čvoru. Dalje povećanje broja neinferiornih rešenja razmatranih u svakom čvoru dovodi do rešenja dobijenog u P3. Treba primetiti da P1 i P2 nude različita rešenja, dok P2 i P3 daju identična rešenja. Upoređivanjem P1 i P2 tehnikom TOPSIS, bolji je

**Tabela 1.** Podaci o granama (dužine i starost)

No.	Starost	Dužina	No.	Starost	Dužina	No.	Starost	Dužina	No.	Starost	Dužina	No.	Starost	Dužina
1	17	0.730	21	-	0.884	41	-	0.738	61	-	0.107	81	6	0.495
2	17	0.787	22	-	0.592	42	-	0.787	62	-	0.398	82	6	0.350
3	17	0.884	23	-	0.738	43	5	0.190	63	-	0.884	83	4	1.175
4	17	0.350	24	-	0.495	44	5	0.156	64	-	0.100	84	13	0.495
5	14	0.787	25	16	0.220	45	5	0.495	65	16	0.190	85	8	0.495
6	14	1.466	26	16	0.398	46	5	0.884	66	16	0.641	86	5	0.495
7	14	0.160	27	16	0.932	47	17	0.910	67	16	0.460	87	10	1.272
8	7	0.398	28	15	0.190	48	17	0.253	68	16	0.820	88	12	1.709
9	7	0.884	29	13	0.495	49	16	0.253	69	10	0.190	89	27	2.000
10	7	0.398	30	28	0.738	50	16	0.156	70	10	0.280	90	16	0.350
11	30	0.301	31	28	0.495	51	13	0.301	71	10	0.220	91	4	0.301
12	30	1.272	32	28	0.495	52	13	0.156	72	10	0.107	92	15	0.204
13	30	0.107	33	28	0.107	53	13	0.301	73	14	1.210	93	-	0.301
14	24	0.301	34	12	0.641	54	13	0.204	74	15	0.130	94	5	0.107
15	30	0.430	35	12	0.204	55	13	0.495	75	12	0.220	95	-	0.738
16	30	0.204	36	11	1.854	56	18	0.850	76	12	0.190	96	-	0.156
17	30	0.204	37	11	0.156	57	18	2.000	77	27	0.940			
18	27	0.592	38	11	0.156	58	18	0.204	78	27	0.490			
19	14	0.156	39	-	0.301	59	10	1.511	79	27	0.190			
20	14	0.641	40	-	0.787	60	10	0.156	80	27	0.495			

**Tabela 2.** Kumulativne vrednosti indeksa pouzdanosti i svedenih vrednosti troškova

Plan	Trošak [\$]	$\sum$ SAIDI	$\sum$ SAIFI	$\sum$ ASIDI
P1	954,340	0.929	0.545	1.120
P2	923,703	0.949	0.555	1.159
P3	923,703	0.949	0.555	1.159
P4	470,242	2.328	1.367	3.120
P5	415,428	2.595	1.507	4.423
P6	586,922	1.577	0.932	2.547
“ne raditi ništa”	0	12.557	6.619	14.361

P2. Ovi rezultati pokazuju da broj neinferiornih rešenja razmatranih u svakom čvoru na grafu utiče na kvalitet rešenja (plana), ali da je samo deo najbolje rangiranih neinferiornih rešenja dovoljan za dobijanje najboljeg višegodišnjeg rešenja. Treba primetiti da plan P3 predlaže zamenu i revitalizaciju kablova, ali zamena kablova dominira. Razlog je što se pouzdanost vrednuje (ponderiše) više od troškova.

Plan P4 se dobija na isti način kao i P3, ali korišćenjem sledećih težinskih faktora:  $w_{CINV}=0.5$ ,  $w_{SAIDI}=w_{SAIFI}=w_{ASIDI}=0.5/3$ . Na ovaj način se opisuje donosilac odluka koji podjednako vrednuje poboljšanje pouzdanosti i trošak. Treba primetiti da plan P4 nudi niži nivo pouzdanosti od P3 i niže troškove za njegovo postizanje. Takođe, revitalizacija dominira u odnosu na zamenu u P3.

Navedeni rezultati pokazuju da predloženi pristup omogućava dobijanje najboljeg rešenja (plana) prema preferencijama donosioca odluka u pogledu nivoa pouzdanosti i troškova. Treba imati na umu da donosilac odluka može da izvrši proračune sa različitim težinskim faktorima, a zatim da izabere rešenje (plan zamene i revitalizacije) koje najbolje reprezentuje deklarisanu ciljevu kompanije.

Plan P5 se dobija kao P4 ali bez uzimanja u obzir indeksa pouzdanosti ASIDI. Nudi nižu cenu od P4, ali je ASIDI znatno lošiji. Treba napomenuti da se kablovske deonice 11, 12, 14 i 89 na fideru B sa industrijskim kupcima revitalizuju znatno kasnije (6-7 godina) u planu P5 nego u P4. To implicira da će veliki industrijski kupci imati niži kvalitet snabdevanja u slučaju trajnih kvarova. Ovaj rezultat naglašava važnost uključivanja indeksa pouzdanosti zasnovanog na opterećenju u dobijanju najboljeg višegodišnjeg plana zamene i revitalizacije kablova. Konačno, plan P6 se dobija kao P3, ali se pretpostavlja da je ograničenje budžeta 600,000 \$ umesto 1,000,000 \$. Smanjenje raspoloživog budžeta dovodi do pogoršanja indeksa pouzdanosti. U ovom slučaju se koristi samo revitalizacija kablova, dok se zamena ne primenjuje. Ovaj rezultat pokazuje da raspoloživi budžet značajno utiče na izbor najboljeg višegodišnjeg plana zamene i revitalizacije.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu se predlaže pristup za određivanje najboljeg višegodišnjeg plana zamene i revitalizacije kablova uzimajući u obzir moguće promene u distributivnoj mreži tokom planskog perioda. Koristi se višekriterijumski MILP model koji omogućava dobijanje skupa neinferiornih planova zamene i revitalizacije u svakoj godini. Dobijena statička rešenja se zatim koriste u okviru predloženog višekriterijumskog algoritma dinamičkog programiranja za generisanje većeg broja različitih višegodišnjih planova zamene i revitalizacije. Ovi planovi se ocenjuju, a najbolji višegodišnji plan se određuje korišćenjem tehnike višekriterijumskog odlučivanja TOPSIS uvažavajući preferencije donosioca odluka. Dobijeni rezultati pokazuju neophodnost razmatranja više godina da bi se odredio najefikasniji plan zamene i revitalizacije. Takođe, oni ističu važnost istovremenog razmatranja zamene i revitalizacije kablova u urbanim distributivnim mrežama u cilju dobijanja najefektnijeg rešenja.

## Zahvalnica

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija (br. ugovora: 451-03-65/2024-03/200156) i Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu kroz projekat "Nučnoistraživački i umetničkoistraživački radb istraživača u nasavničkim i saradničkim zvanjima Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu" (br: 01-3394/1).

## LITERATURA

- [1] Popovic ZN, Knezevic S, Popovic D, 2019, „Risk-based allocation of automation devices in distribution networks with performance based regulation of continuity of supply”, IEEE Trans Power Syst, 34, str. 171-181. doi:10.1109/TPWRS.2018.2857412.
- [2] Popovic ZN, Kovacki NV, 2022, „Multi-period reconfiguration planning considering distribution network automation“, Int Jour of Electr Power & Energy Syst, 139: 107967. doi: 10.1016/j.ijepes.2022.107967.



- [3] Shimakage T, Wu K, Kato T, Okamoto T, Suzuoki Y, 2002, “Economic evaluation of cable replacement considering annual failure probability”, Conference record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 472-475. doi: 10.1109/ELINSL.2002.995977.
- [4] Bloom JA, Feinstein C, Morris P.,2006, “Optimal replacement of underground distribution cables”, IEEE PES Power Systems Conference and Exposition 2006, 389-393. doi: 10.1109/PSCE.2006.296343.
- [5] Eriksson R, Werelius P, Adeen L, Johansson P, Flodqvist H, 2003, “Condition based replacement of medium voltage cables saves millions-case study Botkyrka”, IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, 2003, doi: 10.1109/PTC.2003.1304297.
- [6] Gill Y, 2011, “Development of an electrical cable replacement simulation model to aid with the management of aging underground electric cables”, IEEE Electrical Insulation Magazine, 27, str. 31-37. doi: 10.1109/MEI.2011.5699445.
- [7] Xu L, Brown RE, 2011, “Justifying the proactive replacement of cable”, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, str. 1-6. doi: 10.1109/PES.2011.6039491.
- [8] Buhari M, Levi V, Kapetanaki A, 2018, “Cable replacement considering optimal wind integration and network reconfiguration”, IEEE Trans Smart Grid, 9, str.5752-5763. doi: 10.1109/TSG.2017.2696340.
- [9] Buhari M, Levi V, Awadallah SKE, 2016, “Modelling of ageing distribution cable for replacement planning”, IEEE Trans Power Syst, 31, str. 3996-4004. doi:10.1109/TPWRS.2015.2499269.
- [10] Awadallah SKE, Milanović JV, Jarman PN, 2014, “Reliability based framework for cost-effective replacement of power transmission equipment”, IEEE Trans Power Syst, 29, str.2549-2557. doi: 10.1109/TPWRS.2014.2309337.
- [11] López JC, Lavorato M, Rider MJ, 2016, “Optimal reconfiguration of electrical distribution systems considering reliability indices improvement”, Int Jour of Electr Power & Energy Syst, 78, str.837-845. doi:10.1016/j.ijepes.2015.12.023.
- [12] Council of European Energy Regulators, 6<sup>th</sup> CEER benchmarking report on the quality of electricity and gas supply, 2016. Available: <https://www.ceer.eu/documents/104400/-/-/d064733a-9614-e320-a068-2086ed27be7f>.
- [13] Daellenbach HG, De Kluyver CA, 1980, “Note on multiple objective dynamic programming”, Jour Oper Res Soc, 31, str. 591–94. doi:10.2307/2580846.
- [14] Goh HH, Kok BC, Yeo HT, Lee SW, Zin AAM, 2013, “Combination of TOPSIS and AHP in load shedding scheme for large pulp mill electrical system”, Int Jour of Electr Power & Energy Syst, 47, str.198-204. doi:10.1016/j.ijepes.2012.10.059.
- [15] Nemati HM, Sant'Anna A, Nowaczyk S., 2015, “Reliability evaluation of underground power cables with probabilistic models”, 11<sup>th</sup> International Conference on Data Mining (DMIN'15), str. 37-43.
- [16] EPRI. Guidelines for Intelligent Asset Replacement: Volume 3-Underground Distribution Cables, 2005, Available: [https://www.epri.com/research/products/1010740\\_1010740](https://www.epri.com/research/products/1010740_1010740).
- [17] Cohon JL, Marks DH, 1975, “A review and evaluation of multiobjective programing techniques”, Water resources research, 11, str.208-220. doi: <https://doi.org/10.1029/WR011i002p00208>.
- [18] Willis HL, 2004, “Power Distribution Planning Reference Book”, Marcel Dekker Inc, New York.
- [19] Su CT, Lee CS, 2003, “Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution”, IEEE Trans Power Del, 18, str.1022–1027. doi:10.1109/TPWRD.2003.813641.