

## ОПТИМАЛНО МЕСТО И ВРЕМЕ УГРАДЊЕ УРЕЂАЈА ЗА АУТОМАТИЗАЦИЈУ ДИСТРИБУТИВНЕ МРЕЖЕ

### OPTIMAL TIME AND PLACEMENT OF AUTOMATION DEVICES IN DISTRIBUTION NETWORK

Кристина ЦОДИЋ, Електротехнички факултет, Србија  
Дарко ШОШИЋ, Електротехнички факултет, Србија

#### КРАТАК САДРЖАЈ

Основи циљ оператора дистрибутивног система је да управља дистрибутивном мрежом на ефикасан начин, испоручујући електричну енергију прописаног квалитета крајњим корисницима на најјекономичнији начин уз прихватљив ниво поузданости. Економичност и поузданост су два аспекта, најчешће наспрамна један у односу на други у процесу планирања и пројектовања дистрибутивних мрежа. Уградња опреме за аутоматизацију дистрибутивне мреже је једна од најефективнијих мера којима се утиче на унапређење поузданости кроз смањење трајања прекида испоруке електричне енергије, као и броја погођених корисника. С друге стране, због ограничених расположивих средстава, неопходно је у процесу планирања одабрати најбољи број и локације расклопне опреме како би се постигло највеће унапређење поузданости снабдевања крајњих потрошача. У овом раду је предложен модел, заснован на мешовитом целобројном линеарном програмирању, за одређивање оптималног броја и локације реклозера за аутоматизацију средњенапонских дистрибутивних мрежа у оквиру десетогодишњег плана развоја дистрибутивне мреже, уважавајући ограничене материјалне ресурсе који ће бити на располагању.

**Кључне речи:** Оптимално постављање реклозера, мешовито целобројно линеарно програмирање, ограничени новчани ресурси

#### ABSTRACT

The main goal of the distribution system operator is to manage the distribution network in an efficient manner, delivering electricity of the required quality to end users in the most economical way with an acceptable level of reliability. Cost– effectiveness and reliability are two aspects, most often opposite to each other in the process of planning and designing distribution networks. Installation of automation equipment for the distribution network is one of the most effective measures that affects the improvement of reliability by reducing the duration of interruption of electricity supply, as well as the number of affected customers. On the other hand, due to the limited resources available, it is necessary to select the best number and locations of switching equipment in the planning process in order to maximize the reliability of end– user supply. This paper proposes a mixed integer linear programming model for determining the optimal number and location of reclosers in a medium voltage distribution network within a 10 year distribution network development plan, taking into account the limited material resources that will be available.

**Key words:** Optimal recloser placement, Mixed Integer Linear Programming (*MILP*), limited financial resources

Кристина Цодић, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, Булевар краља Александра 73, 11000 Београд, [kristinadz@etf.rs](mailto:kristinadz@etf.rs)  
Дарко Шошић, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, Булевар краља Александра 73, 11000 Београд, [sosic@etf.rs](mailto:sosic@etf.rs)

#### УВОД

Током последњих неколико деценија, друштвене, економске, политичке и технолошке промене условиле су промене у организацији и начину управљања у електроенергетском систему. Ово се у великој мери одразило на операторе дистрибутивних система који се суочавају са значајним променама које су

последица процеса дерегулације и приватизације, све веће инсталисане снаге дистрибутивних генератора, система за складиштење електричне енергије, као и захтева за стално унапређење квалитета и поузданости испоручене електричне енергије.

Повећање поузданости дистрибутивне мреже може се постићи на два начина: смањењем интензитета и броја кварова, и смањењем трајања времена прекида напајања. Код првог од наведених начина се захтевају значајне инвестиције у елементе мреже (на пример, замена ваздушних кабловским водовима, реконструкција водова са великим интензитетом кварова, итд.). Код другог начина нагласак је на смањењу трајања времена прекида напајања кроз ефикаснију идентификацију места квара (што се постиже увођењем аутоматике: детектора квара, даљински управљаних прекидача и растављача снаге) и бржу промену уклопног стања мреже при изолацији квара и обнављању напајања делова мреже без квара. Увођењем уређаја за аутоматизацију смањује се, или у потпуности потишћује ангажовање екипа на терену за потребе управљања кваром. Применом аутоматике, поред смањења штете услед прекида напајања, редукују се и оперативни трошкови због смањеног броја прекидачких операција при изолацији квара и обнови напајања делова мреже без квара [1].

Процес аутоматизације дистрибутивне мреже подразумева значајна инвестициона улагања, а како су расположива средства најчешће ограничена, неопходно је у процесу планирања одабрати најбољи број и локације расклопне опреме како би се постигло највеће могуће унапређење поузданости снабдевања крајњих потрошача. Одређивање оптималног сценарија аутоматизације, односно избор врсте, броја и места уградње аутоматизованих уређаја у дистрибутивним мрежама је сложен комбинаторни оптимизациони проблем, за чије решавање се ефикасном показала метода мешовитог целобројног линеарног програмирања (*Mixed Integer Linear Programming, MILP*). Већина истраживања на ову тему која користи *MILP*, подразумева налажења оптималног броја и позиција у мрежи за једну врсту уређаја [2– 5].

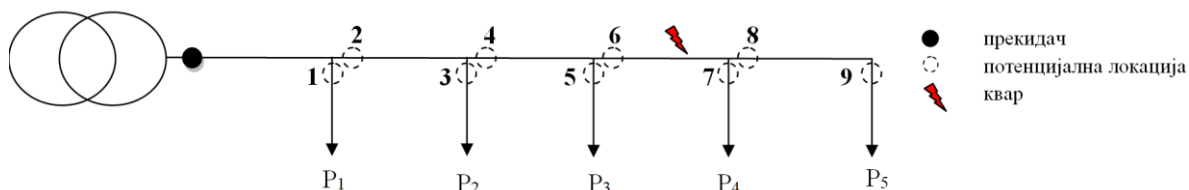
У овом раду је предложен начин за одређивање броја, типа и локације уређаја за аутоматизацију дистрибутивне мреже, заснован на примени *MILP* оптимизације, а истовремено се разматрају следећи даљински надгледани и контролисани уређаји: аутоматски прекидачи са поновним укључењем (реклозери), склопке– растављачи (секционери) и индикатори проласка струје квара. Тражи се решење за десетогодишњи план улагања у аутоматизацију дистрибутивне мреже, са циљем да се минимизује неиспоручена електрична енергија, уз уважавање ограничења материјалних средстава која се имају на располагању сваке године.

## ОПИС ПРОБЛЕМА

Дистрибутивне мреже у нормалним условима обично функционишу као радијалне, при чему се, у зависности од структуре мреже, код неких потрошача може обезбедити алтернативно напајање са два или више извода. У овом раду се врши оптимизација постављања уређаја за аутоматизацију радијалне дистрибутивне мреже без могућности алтернативног напајања са циљем да се минимизује неиспоручена електрична енергија. Уобичајено је да се неиспоручена енергија израчунава за период од годину дана, тако да се често користи и термин очекивана годишња неиспоручена енергија. Да би се добила ова вредност треба проценити трајање прекида напајања потрошача за случај свих могућих кварова. У разматрањима која следе уважавају се само трајни кварови, а пролазни се елиминишу деловањем одговарајућих уређаја (на пример, аутоматским поновним укључењем прекидача).

Даљински надгледани и управљани реклозери, секционери и индикатори квара су уређаји који унапређују поузданост дистрибутивне мреже. Њихов утицај на трајање прекида испоруке енергије ће бити показан на примеру поједностављеног радијалног извода приказаног на Сл. 1. Разматра се квар на деоници означеној на слици. Испрекиданим круговима су приказане локације кандидати за постављање нових уређаја.

Ако сем прекидача на почетку извода не постоји ниједан други уређај за управљање кваром, по настанку квара, изводни прекидач се искључује и без напајања остају сви корисници који се налазе на том изводу. Прекид напајања траје онолико колико је потребно да се екипа пошаље на терен, локализује квар и изврши његово отклањање.



СЛИКА 1 ПОЈЕДНОСТАВЉЕНИ РАДИЈАЛНИ ИЗВОД

Уколико је на локацији означеној бројем 4 уграђен реклозер, онда ће за означен квар остати без напајања само корисници који се налазе иза реклозера ( $P_3$ ,  $P_4$  и  $P_5$ ), док они који се налазе испред ( $P_1$  и  $P_2$ ) неће осетити прекид. Потрошачи иза реклозера ће без напајања остати краћи временски период у односу на случај без било каквог уређаја, јер сада екипа не мора да претражује дужину целог извода, већ само део иза позиције 4.

Ако се на позицији 4 угради даљински надгледани и управљани секционер, корисници  $P_1$  и  $P_2$  ће осетити краткотрајни прекид напајања. Кад се деси квар, прекидач на почетку извода ће прекинути струјно коло, тако да сви корисници осећају прекид напајања. Како је и секционер детектовао струју квара, из центра управљања се закључује да је квар низводно од њега и даје се наредба за секционисање извода, чиме се део мреже са кваром изољује од остатка мреже. Поновним укључењем изводног прекидача корисницима  $P_1$  и  $P_2$  се враћа напајање, тако да њихова безнапонска пауза траје јако кратко, најчешће мање од једног минута. Потрошачи низводно од секционера морају да сачекају да екипе на терену нађу квар и отклоне га. Налажење квара ће у овом случају бити исто као и да је инсталиран реклозер, јер се опет претражује само део извода низводно од секционера.

За случај да је на позицији 4 даљински надгледани индикатор проласка струје квара, за посматрани квар сви корисници на изводу би остали без напајања, али би време налажења квара било краће него да не постоји ниједан уређај, јер би екипе на терену претраживале само део извода низводно од индикатора квара.

Очигледно да је, са аспекта поузданости, најбоље решење уградња реклозера, али оно подразумева и највећу инвестицију. Оправдано је усвојити претпоставку да су на располагању ограничена средства која се могу уложити у аутоматизацију мреже, па треба наћи решење које представља компромис између економичности и побољшања поузданости. Овај проблем представља сложен комбинаторни проблем за чије решавање је у наставку предложена метода мешовитог целобројног линеарног програмирања.

## ФОРМУЛАЦИЈА MILP ПРОБЛЕМА ЗА АУТОМАТИЗАЦИЈУ ДИСТРИБУТИВНЕ МРЕЖЕ

Проблеми линеарног програмирања су проблеми у којима је критеријумска функција линеарна и допустив скуп променљивих је задат линеарним једначинама и неједначинама. Уколико се у проблему линеарног програмирања захтева да све променљиве буду целобројне, онда се проблем назива проблемом целобројног програмирања, а уколико се захтева да само неке променљиве буду целобројне, онда се то зове проблем мешовитог целобројног програмирања. У проблему који се анализира неке променљиве ће бити целобројне, а остале припадају скупу позитивних бројева.

Траже се оптималне локације за постављање различитих уређаја за аутоматизацију дистрибутивне мреже (реклозери, секционери и индикатори проласка струје квара). Потенцијалним локацијама за уградњу се сматрају почести свих деоница у мрежи, а такође се разматра и могућност уградње реклозера или секционера на месту на коме већ постоји индикатор квара.

Вектор променљивих које се траже у оптимизацији чине: субматрице– колоне (вектори)  $[y^r]$ ,  $[y^s]$  и  $[y^i]$  што су вектори чија је дужина једнака броју потенцијалних локација за уградњу уређаја и садрже бинарне променљиве 0 и 1 у зависности од тога да ли је реклозер, секционер или индикатор квара инсталиран на одговарајућој позицији,  $[d_i]$  је вектор који садржи континуалне променљиве које се односе на време трајања квара на  $i$ - тој грани,  $[r_{iw}]$ ,  $[z_{ki}]$  и  $[b_{ki}]$  су вектори помоћних бинарних променљивих, односно  $[a_{ki}]$  вектор помоћних континуалних променљивих о чијем ће значењу бити речи касније,  $[d_{ki}]$  је вектор континуалних променљивих који се односи на трајање прекида напајања чвора  $k$  за случај квара на грани  $i$ ,  $[m_i]$  је вектор који показује да ли је дошло до замене индикатора квара другим уређајем на некој позицији. Математички модел којим се решава оптимизациони проблем је дат релацијама (1)– (21).

Критеријумска функција

$$\min ENS = \min \sum_{k=1}^N P_k \left( \sum_{i=1}^{N_k} \lambda_i d_{ki} \right) \quad (1)$$

Ограничења типа једнакости

$$d_i = T_i + T_f, \forall i = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$T_i = \frac{\sum_{w \in N_b} r_{iw} l_w}{20} \quad (3)$$

Ограничења типа неједнакости

$$z_{ki} \leq 1 - \frac{A_{ki} y^r}{N_b} \quad (4)$$

$$z_{ki} \geq 1 - A_{ki} y^r \quad (5)$$

$$b_{ki} \leq 1 - \frac{A_{ki} y^r}{N_b} \quad (6)$$

$$b_{ki} \geq 1 - A_{ki} y^r \quad (7)$$

$$r_{iw} \geq 1 - \sum_{v \in ni} (y_v^r + y_v^s + y_v^i) \quad (8)$$

$$r_{iw} \leq 1 - \sum_{v \in ni} (y_v^r + y_v^s + y_v^i) / N_b \quad (9)$$

$$y_v^r + y_v^s + y_v^i \leq 1, (\forall v = 1, \dots, N_k) \quad (10)$$

$$\sum_{v=1}^{N_b} C_r (y_v^r - y_{v0}^r) + C_s (y_v^s - y_{v0}^s) + C_i (y_v^i - y_{v0}^i) + C_{iz} m_v \leq C_{god} \quad (11)$$

$$a_{ki} \leq 10 \cdot b_{ki} \quad (12)$$

$$a_{ki} \leq d_i - d_{iz} \quad (13)$$

$$a_{ki} \geq d_i - d_{iz} - 10 \cdot (1 - b_{ki}) \quad (14)$$

$$d_{ki} \leq 10 \cdot z_{ki} \quad (15)$$

$$d_{ki} \leq a_{ki} + d_{iz} \quad (16)$$

$$d_{ki} \geq a_{ki} + d_{iz} - 10 \cdot (1 - z_{ki}) \quad (17)$$

$$m_i \leq y_{v0}^i \quad (18)$$

$$m_i \leq 1 - y_v^i \quad (19)$$

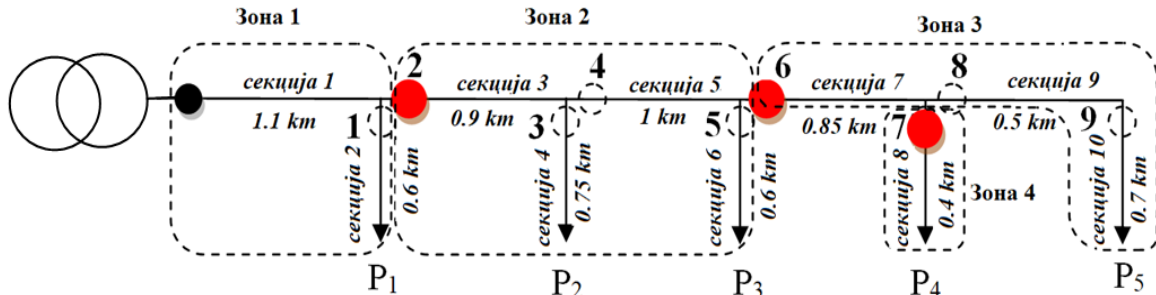
$$m_i \geq y_{v0}^i - y_v^i \quad (20)$$

$$\sum_{v=1}^{N_b} y_v^i \geq \sum_{v=1}^{N_b} y_{v0}^i \quad (21)$$

Циљ постављања уређаја за аутоматизацију је да се минимизује годишња неиспоручена електрична енергија, односно показатељ поузданости  $ENS$  (*Energy not supplied index*) [6], што је исказано изразом (1), где је  $N$  укупан број чворова у мрежи,  $P_k$  је снага потрошње у чвору  $k$  ( $\forall k=1, \dots, N$ ),  $N_b$  је укупан број елемената на којима се дешавају кварови у мрежи,  $\lambda_i$  је интензитет кварова на елементу  $i$ , а  $d_{ki}$  је трајање прекида напајања чвора  $k$  за случај квара на  $i$ - том елементу. У овом раду ће се разматрати само кварови на водовима у средњенапонској мрежи.

Ограничење (2) односи се на време трајања квара на  $i$ - тој грани,  $d_i$ , које је изражено као збир времена тражења квара  $T_i$  и времена отклањања квара,  $T_f$  [7]. Сматра се да време  $T_f$  не зависи од места квара и узима константну вредност од 3 h. С друге стране, време тражења квара зависи од места квара и опремљености мреже заштитним уређајима. На Сл. 2 је приказан дистрибутивни извод који има 10 секција, и инсталиране уређаје на почетку 1., 3., 7. и 8. секције. Ма која од три посматране врсте уређаја да је инсталирана на овим позицијама, даће информацију о томе у којој се од 4 зоне квар десио.

Усвојена је претпоставка да је време трајања квара пропорционално са укупном дужином свих секција које припадају зони у којој се десио квар, и да је брзина тражења квара 20 km/h.



СЛИКА 2 ЗОНЕ ДЕФИНИСАНЕ УРЕЂАЈИМА ЗА АУТОМАТИЗАЦИЈУ

Тако би време трајања квара за сваку од секција приказаних на претходној слици износило:

$$T_1 = T_2 = \frac{1.1+0.6}{20} = 0.085 h$$

$$T_3 = T_4 = T_5 = T_6 = \frac{0.9+0.75+1+0.6}{20} = 0.1625 h$$

$$T_7 = T_9 = T_{10} = \frac{0.85+0.5+0.7}{20} = 0.1025 h$$

$$T_8 = \frac{0.4}{20} = 0.02 h$$

Ово се математички формулише изразом (3) у коме бројилац представља укупну дужину свих секција у зони једног уређаја,  $l_w$  је дужина  $w$ -те гране, а  $r_{iw}$  је бинарна променљива која показује да ли гране  $i$  и  $w$  припадају истој зони.

У оквиру ограничења типа једнакости се такође дефинише где постоје реклозери и секционери у затеченом стању, односно на почетку сваке године. На пример, ако постоји реклозер на некој грани, онда се одговарајућем елементу у вектору  $[y^r]$  додељује вредност 1.

Помоћна бинарна променљива  $z_{ki}$  је повезана са постављањем реклозера. Улога ове променљиве је да покаже да ли ће квар на грани  $i$  да искључи потрошаче у чвору  $k$  или постоји реклозер који ће да искључи део мреже који је погођен кваром и сачува потрошаче у чвору  $k$ . Променљива  $z_{ki}$  узима вредности:

$$z_{ki} = \begin{cases} 0, & \text{ако квар на грани } i \text{ не искључује чвор } k \\ 1, & \text{ако квар на грани } i \text{ искључује чвор } k \end{cases}$$

Да би се дефинисало како се добија вредност променљиве  $z_{ki}$ , на основу конфигурације мреже се за сваки чвор и сваку грану дефинише низ  $A_{ki}$ . Овај низ има дужину броја грана и има јединице на оним позицијама за које важи да би инсталирање реклозера на грани која одговара тој позицији спречило да дође до прекида потрошње у чвору  $k$  за случај квара на грани  $i$ . Овај принцип усвојен је из [8]. Након формирања низова  $A_{ki}$ , могу се дефинисати ограничења која ће дати променљивој  $z_{ki}$  вредност 0 или 1. Ограничења (4) и (5) фиксирају вредност  $z_{ki}$  на 0 ако постоји бар један реклозер који ће да спаси чвор  $k$  за случај квара на грани  $i$ , односно на 1 ако нема таквог реклозера.

На исти начин се дефинише и бинарна променљива  $b_{ki}$ , само што се она односи на секционере и дефинисана је ограничењима (6) и (7). Променљива  $b_{ki}$  показује да ли постоји секционер који ће моћи да изолиује квар на грани  $i$  и тиме врати напајање у чвору  $k$  и узима следеће вредности:

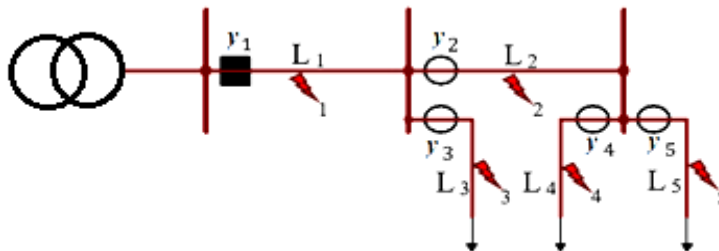
$$b_{ki} = \begin{cases} 0, & \text{постоји секционер који изолиује квар на грани } i \text{ и враћа напајање у чвор } k \\ 1, & \text{не постоји секционер који изолиује квар на грани } i \text{ и враћа напајање у чвор } k \end{cases}$$

Помоћу ограничења (8) и (9) се задаје како се рачуна вредност помоћне бинарне променљиве  $r_{iw}$  чија је улога да дефинише да ли се две гране налазе у истој зони или не и то на следећи начин:

$$r_{iw} = \begin{cases} 0, & \text{ако гране } i \text{ и } w \text{ не припадају истој зони} \\ 1, & \text{ако гране } i \text{ и } w \text{ припадају истој зони} \end{cases}$$

Скupu  $n_i$  припадају гране чији се почетак налази између грана  $i$  и  $w$ .

Примена ограничења (8) и (9) биће показана на мрежу приказаној на Сл. 3. У њој постоји 4 локација кандидата  $y_2$ – $y_5$  за постављање уређаја за аутоматизацију мреже, на позицији  $y_1$  већ постоји прекидач и има 5 деоница на којима се може десити квар  $L_1$ – $L_5$ .



СЛИКА 3 ПОКАЗНА МРЕЖА ЗА ПРИМЕНУ ОГРАНИЧЕЊА (8) И (9)

За мрежу са Сл. 3 се израз (8) може написати у следећем облику:

$$[r_{iw}] \geq 1 - \begin{bmatrix} 0 & y_2 & y_3 & y_2 + y_4 & y_2 + y_5 \\ y_2 & 0 & y_2 + y_3 & y_4 & y_5 \\ y_3 & y_2 + y_3 & 0 & y_2 + y_3 + y_4 & y_2 + y_3 + y_5 \\ y_2 + y_4 & y_4 & y_2 + y_3 + y_4 & 0 & y_4 + y_5 \\ y_2 + y_5 & y_5 & y_2 + y_3 + y_5 & y_4 + y_5 & 0 \end{bmatrix}$$

У претходном изразу врста  $j$  се односи на квар на  $j$ -тој грани а  $m$ -ти члан те врсте показује које све потенцијалне локације постоје између  $j$ -те и  $m$ -те гране. На пример, када би постојао било који од три побројане врсте уређаја инсталиран на позицијама  $y_3$  и  $y_5$ , тада би било  $y_3=1, y_5=1$ . Да би биле задовољене неједнакости (8) и (9), елементи матрице  $[r_{iw}]$  морају узети следеће вредности:

$$[r_{iw}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

У једној врсти су јединице на позицијама грана које припадају истој зони.

Ограничењем (10) се исказује да на једној потенцијалној локацији може бити постављен само један од три врсте уређаја, а ограничење (11) дефинише годишње новчане ресурсе који су на располагању за куповину и трошкове уградње свих уређаја. У изразу (11) су  $C_r$ ,  $C_s$  и  $C_i$  трошкови куповине и уградње реклозера, секционера и индикатора квара, респективно,  $C_{iz}$  је трошак премештања индикатора квара који се има уколико се на место индикатора поставља други уређај,  $y_{v0}^r$ ,  $y_{v0}^s$  и  $y_{v0}^i$  су бинарне променљиве које показују да ли је одговарајући уређај на почетку анализирани године био инсталиран на локацији  $v$ , а  $m_v$  је бинарна променљива која показује да ли је дошло до уклањања и поновне уградње индикатора квара, а  $C_{god}$  је годишњи новчани износ који се може утрошити на аутоматизацију мреже.

Време трајања прекида напајања у чвору  $k$ , за квар на грани  $i$ ,  $d_{ki}$  зависи од тога где у мрежи постоје реклозери, секционери и индикатори квара и какав је положај квара и посматраног чвора са потрошњом. Време изолације квара секционером  $d_{iz}$  је време потребно да се елемент са кваром изолује од осталог дела мреже. Пошто су секционери даљински управљани, изоловање елемената у квару се изводи у веома кратком временском интервалу (мање од минута). Овде се, ради општости, усваја  $d_{iz}=0.1$  h. Табелом 1 је описано које се вредности прекида напајања добијају за све могуће комбинације  $z_{ki}$  и  $b_{ki}$ .

Сва могућа времена трајања квара се могу објединити следећим изразом који се не може написати преко ограничења типа једнакости у проблему линеарног програмирања:

$$d_{ki} = z_{ki}(b_{ki}(d_i - d_{iz}) + d_{iz}) = z_{ki}(a_{ki} + d_{iz}).$$

Ова тешкоћа се може отклонити тако што ће се увести додатна ограничења типа неједнакости (12) – (17) као што је описано у [9].

Могућност постављања секционера или реклозера на место на коме до тада постоји индикатор квара се уважава увођењем суб-вектора променљивих  $[m_i]$  чији елементи имају вредност 1 уколико је дошло до уклањања индикатора квара са неке позиције и његовог поновног постављања на нову локацију. Ово се може

ТАБЕЛА 1 МОГУЋА ВРЕМЕНА ТРАЈАЊА ПРЕКИДА

$z_{ki}$	$b_{ki}$	Значење	$d_{ki}$
1	1	нема ни реклозера ни секционера који би спасли чвор $k$ у случају квара на грани $i$ , што значи да ће прекид трајати колико и отклањање квара	$d_i$
1	0	Нема реклозера, али постоји секционер који ће да локализује квар и чијим отварањем се враћа напајање у чвор $k$	$d_{iz}$
0	1	Реклозер искључује квар на грани $i$ , тако да га потрошачи у чвору $k$ неће осетити	0
0	0	Реклозер искључује квар на грани $i$ (мада постоји и секционер који би могао да га локализује), тако да потрошачи у чвору $k$ неће уопште доживети прекид напајања	0

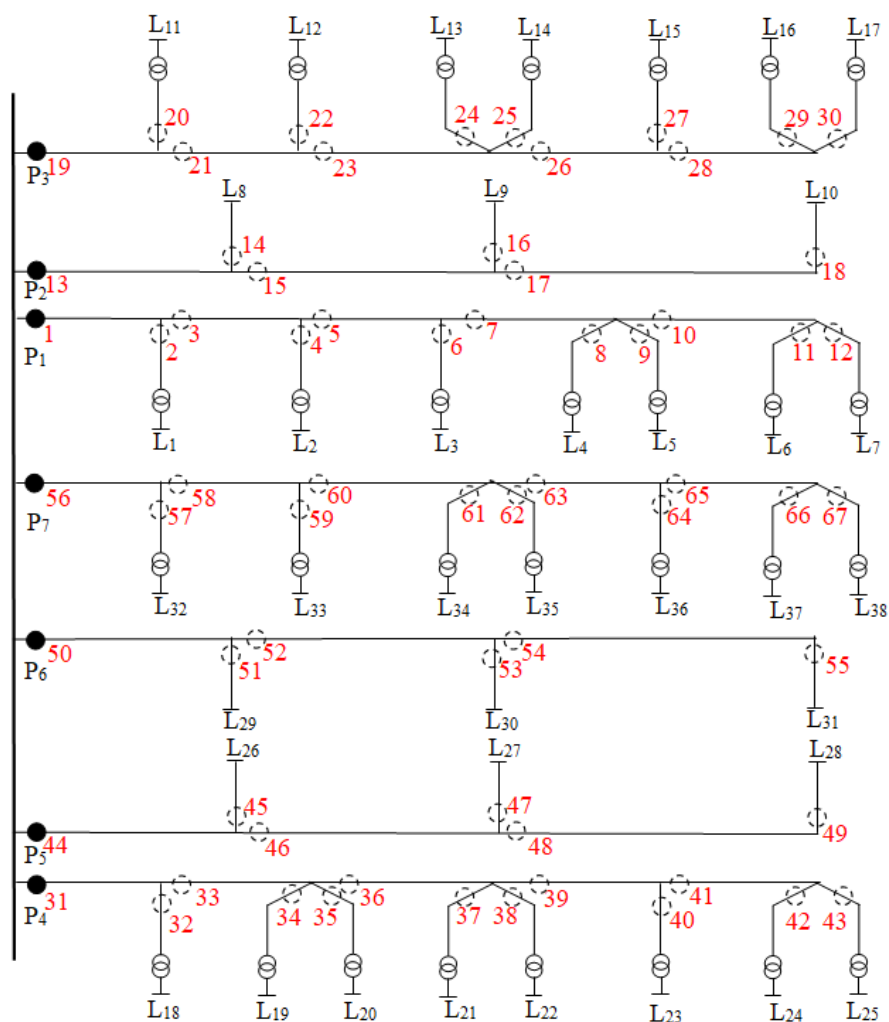
формулисати тако што ће се вредност променљивих из вектора  $[m_i]$  добити на следећи начин:

$$m_v = y_{v0}^i(1 - y_v^i)$$

Претходним изразом се постиже да променљива  $m_v$  има вредност 1 уколико је у затеченом стању индикатор квара постојао на  $v$ -тој локацији,  $y_{v,0}^i = 1$ , а у текућој години се уклања са те позиције,  $y_v^i = 0$ . Укључење променљивих  $[m_i]$  постиже се додавањем ограничења (18) – (20), уз додатно ограничење (21) да број индикатора квара по извршеној оптимизацији мора бити већи или једнак од броја до тада постојећих индикатора квара у мрежи.

## РЕЗУЛТАТИ

Описани поступак дефинисања оптималних локација за уградњу реклозера, секционера и индикатора квара у оквиру десетогодишњег плана аутоматизације дистрибутивне мреже примењен је на стандардној тест дистрибутивној мрежи за анализу поузданости RBTS Bus 4 чији је детаљан опис дат у [10], а приказана је на Сл. 5. Разматрају се само кварови на водовима. Усвојено је да је затечено стање такво да на почетку сваког од седам извода постоји прекидач. Потенцијалне локације за уградњу уређаја су на почетку сваке деонице и на слици су означене црвеним бројевима. Трошак куповине и уградње за сваки од анализираних уређаја је приказан у Табели 2 и усвојено је да је трошак премештања индикатора квара исти као и трошак уградње. Сматра се да је годишњи новчани износ који се улаже у аутоматизацију 15 000 € и да се преостали износ из текуће преноси у наредну годину.



СЛИКА 3 ЈЕДНОПОЛНА ШЕМА RBTS BUS 4 ДИСТРИБУТИВНЕ МРЕЖЕ

ТАБЕЛА 2 УСВОЈЕНЕ ЦЕНЕ УРЕЂАЈА И УГРАДЊЕ УРЕЂАЈА ЗА АУТОМАТИЗАЦИЈУ

Уређај	Цена уређаја [€]	Цена уградње [€]	Укупно [€]
Реклозер	11 000	4100	15 100
Секционер	9 000	3250	12 250
Индикатор квара	1 500	350	1 850

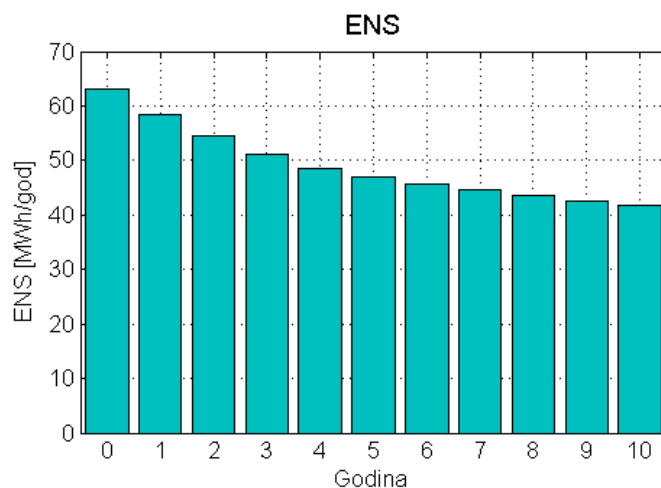
Добијени резултати приказани су у Табели 3, а промена показатеља *ENS* из године у годину је графички приказана на Сл. 6.

Резултати из Табеле 3 показују да су током првих година за унапређење поузданости погодне локације за уградњу приближно на половини дужине сваког извода и да је боље инсталирати секционер и један индикатор квара него само реклозер. Разлог је то што је предност реклозера у односу на секционер, у овом моделу, само 0.1 h уштеде у прекиду напајања код потрошача који се налазе узводно од места постављања при квару који се дешава низводно, а збир трошка уградње секционера и индикатора квара је мањи од трошка уградње реклозера. Показује се да је у почетку анализираних десетогодишњег периода, када има више непокривених критичних локација за уградњу, боље инсталирати више уређаја, односно секционер и један или два индикатора него само један реклозер. Након прве две године, секционере најчешће треба уградити на позиције на којима је до тада био индикатор квара, јер је током претходних година исти био уграђен на критичну локацију. Са Сл. 4 се види да уградња уређаја за аутоматизацију има највише ефекта на унапређење показатеља *ENS* у првим годинама и да са временом све мање утиче.

ТАБЕЛА 3 РЕЗУЛТАТИ ДОБИЈЕНИ ЗА АУТОМАТИЗАЦИЈУ МРЕЖЕ У БУДУЋЕМ ДЕСЕТОГОДИШЊЕМ ПЕРИОДУ

Редни број године	Уградња реклозера на позицијама	Уградња секционера на позицијама	Уградња индикатора квара на позицијама	Премештање индикатора квара
1.	/	36	7	/
2.	/	63	26	/
3.	/	26	10, 60	са 26 на 23 са 7 на 5
4.	/	7	54	са 10 на 15 са 5 на 39
5.	/	39	5	са 15 на 17 са 54 на 52 са 39 на 46
6.	/	17	10	са 17 на 15 са 52 на 54 са 46 на 33
7.	/	57	46	са 15 на 21 са 54 на 52
8.	/	52	35	са 33 на 32 са 46 на 48 са 52 на 54
9.	46	/	/	/
10.	/	60	3	са 48 на 15 са 60 на 33





СЛИКА 6 ПРОМЕНА ПОКАЗАТЕЉА *ENS*

## ЗАКЉУЧАК

У раду је предложен математички модел за прављење плана аутоматизације средњенапонске дистрибутивне мреже који се заснива на решавању *MILP* проблема. Примена на тест мрежи је показала да се моделом постиже побољшање показатеља *ENS*. Предност предложене методе у односу на методе из исте области је уважавање више различитих уређаја за аутоматизацију, и могућност замене постојећег уређаја новим друге врсте. Наставак истраживања ће бити усмерен ка унапређењу предложеног модела тако да уважава и дистрибуиране производне јединице и да буде применљив на мрежама са могућношћу двостраног напајања.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Popović, D., Bekut, D., & Treskanica, V. (2004). *Specijalizovani DMS algoritmi*. DMS Group.
2. Heidari, A., Agelidis, V. G., Kia, M., & Setayeshnazar, M. (2013, September). Mixed-integer programming optimization-based method for switch device placement in distribution systems considering distributed generation. In *2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)* (pp. 1–5). IEEE.
3. Abiri-Jahromi, A., Fotuhi-Firuzabad, M., Parvania, M., & Mosleh, M. (2011). Optimized sectionalizing switch placement strategy in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(1), 362–370.
4. Nader A, Ruben C, Dhulipala SC, Bretas AS, da Silva RA. MILP Model for Reliability Optimization In Active Distribution Networks. In *2018 North American Power Symposium (NAPS) 2018 Sep 9* (pp. 1–6). IEEE.
5. Gludpetch S, Tayjasanant T. Optimal placement of protective devices for improving reliability indices in Microgrid system. In *2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) 2013 Dec 8* (pp. 1–6). IEEE.
6. Allan, R. N. (2013). *Reliability evaluation of power systems*. Springer Science & Business Media.
7. Derakhshandeh, S. Y., & Nikbakht, M. (2018). A new mixed-integer linear formulation for optimal placement of fault indicators in distribution systems. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 28(12), e2631.
8. Pau, M., Ponci, F., & Monti, A. (2019, May). Optimal placement of sectionalizing switches for radial distribution grids. In *2019 1st International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area (SyNERGY MED)* (pp. 1–6). IEEE.
9. AIMMS, B. (2016). *AIMMS Modeling Guide—Integer Programming Tricks*. Haarlem, The Netherlands: AIMMS BV [https://download.aimms.com/aimms/download/manuals/AIMMS3OM\\_IntegerProgrammingTricks.pdf](https://download.aimms.com/aimms/download/manuals/AIMMS3OM_IntegerProgrammingTricks.pdf). Pinedo, Michael. *Scheduling: theory, algorithms, and systems*. Springer.
10. Allan, R. N., Billinton, R., Sjarief, I., Goel, L., & So, K. S. (1991). A reliability test system for educational purposes—basic distribution system data and results. *IEEE Transactions on Power systems*, 6(2), 813–820.