

UDK 621.311:336.15:621.316

# OVISNOST POKAZATELJA POUZDANOSTI DISTRIBUCIJSKE MREŽE O FINANCIJSKIM ULAGANJIMA U MREŽU

## DEPENDENCY OF RELIABILITY INDICES OF DISTRIBUTION NETWORK ON FINANCIAL INVESTMENTS IN THE NETWORK

Vitomir KOMEN – Slavko KRAJCAR

**Sažetak:** Pouzdanost distribucijske mreže je temeljna sastavnica kvalitete opskrbe električnom energijom. Osnovna zadaća operatora mreže je planiranje i razvoj mreže kroz kontinuiranu izgradnju i financijska ulaganja u mrežu, radi postizanja odgovarajuće razine kvalitete opskrbe. U ovom radu je istražena i utvrđena, na primjeru jedne karakteristične distribucijske mreže, korelacijska ovisnost pokazatelja pouzdanosti distribucijske mreže o ukupnim financijskim ulaganjima u mrežu.

**Ključne riječi:**

- kvaliteta opskrbe
- distribucijska mreža
- pokazatelji pouzdanosti
- investicijska ulaganja
- ukupna financijska ulaganja

**Abstract:** Distribution network reliability is the basic integral part of electric power supply reliability. The main task of the network operator is the planning and development of a network through continuous construction and financial investments in the network, in order to achieve an adequate level of supply quality. This paper researches and defines the correlational dependency of distribution network reliability index on total financial investments in the network, based on the example of a characteristic distribution network.

**Keywords:**

- supply quality
- distribution network
- reliability indices
- capital investments
- total financial investments

### 1. UVOD

Elektroprivredna djelatnost jedna je od gospodarskih grana, u kojoj i kratkotrajni poremećaj u opskrbi električnom energijom izaziva veoma osjetljiv zastoj svakodnevnih aktivnosti, a dugotrajni je nezamisliv, jer bi ne samo ugrozio nego spustio današnju civilizacijsku razinu. Krupniji poremećaji u redovitoj opskrbi električnom energijom imali bi dalekosežne nepovoljne posljedice u društvu i uzrokovali bi tešku prilagodbu. Stoga je u današnjem energetske zakonodavstvu posebna pažnja posvećena sigurnosti odnosno kvaliteti opskrbe električnom energijom, a koja se sastoji od pouzdanosti elektroenergetskog sustava, kvalitete električne energije i kvalitete usluga korisnicima mreže. Pouzdanost elektroenergetskog sustava temeljno određuje pouzdanost distribucijskog sustava odnosno distribucijskih mreža, dijela elektroenergetskog sustava

### 1. INTRODUCTION

The electric power industry is one of the industrial branches, in which even a short-term interruption of electric power supply causes very sensitive stoppage of everyday activities, and long-term interruption is unimaginable, because it would not only endanger but it would also lower today's civilization level. Greater outages in regular electrical power supply would have extensive unfavorable consequences in the society and cause difficult adjustments. Therefore, today's energy legislation pays special attention to safety, i.e. quality of electric power supply, which consists of the reliability of the electric power system, electric power quality and quality of services for network customers. The electric power system reliability basically determines the distribution system reliability, i.e. the reliability of distribution networks, the part of the electric power

sa najvećim brojem elemenata i dijela na koji su priključeni potrošači (kupci) električne energije.

Mjerila za vrednovanje pouzdanosti distribucijske mreže su pokazatelji pouzdanosti, veličine od ključnog značaja za razumijevanje ponašanja pojedinih elemenata odnosno mreže u cjelini.

Od interesa je utvrđivanje tehničkih i organizacijskih mjera za poboljšanje pouzdanosti distribucijskih mreža, a posebice utvrđivanje kvantificiranih korelacijskih ovisnosti i utjecaja određenih tehničkih mjera na pokazatelje pouzdanosti.

U ovom radu istražena je ovisnost i utjecaj ukupnih financijskih ulaganja u razvoj distribucijske mreže na poboljšanje pokazatelja pouzdanosti.

## 2. POKAZATELJI POUZDANOSTI DISTRIBUCIJSKIH MREŽA

Pokazatelji pouzdanosti distribucijskih mreža su [1]:

1. Osnovni pokazatelji pouzdanosti distribucijskih mreža
  - a) srednja frekvencija kvara (prekida)

$$f_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (1)$$

- b) srednje vrijeme trajanja kvara (prekida)

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (2)$$

- c) neraspoloživost ili srednje godišnje vrijeme trajanja kvara (prekida)

$$N_s = r_s f_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i \quad (3)$$

2. Dodatni pokazatelji pouzdanosti razdjelnih mreža  
Dodatni pokazatelji pouzdanosti se dijele na pokazatelje orijentirane potrošaču (customer-oriented indices) i na pokazatelje orijentirane opterećenju i energiji (load and energy-oriented indices).

- 2.1. Pokazatelji pouzdanosti distribucijskih mreža orijentirani potrošaču su:

- a) SAIFI, indeks prosječne učestalosti prekida sustava (*System Average Interruption Frequency Index*)

$$SAIFI = \frac{\sum f_i n_i}{\sum n_i} \left[ \frac{\text{prekida}}{\text{pot., god.}} \right] \quad (4)$$

gdje su  $f_i$  frekvencija prekida napajanja čvora odnosno potrošačke točke  $i$  (npr. transformatorske stanice 10/0.4 kV), a  $n_i$  broj

system with the greatest number of elements and the part to which customers of electric power are connected.

Standards for distribution network reliability are reliability indices of the distribution network, standards of essential importance for understanding the behavior of individual elements, i.e. the network as a whole.

It is also important to determine technical and organizational standards for the improvement of distribution network reliability, and especially to determine the quantifying correlational dependencies and the influence of determined technical standards on the reliability indices.

This paper researches the dependency and influence of the total financial investments in the distribution network development on improvement of the reliability index.

## 2. DISTRIBUTION NETWORK RELIABILITY INDICES

Distribution network reliability indices are [1]:

1. A basic distribution network reliability index
  - a) medium fault (interruption) frequency

- b) medium fault (interruption) duration

- c) unavailability or average annual fault (interruption) duration

2. Additional distribution networks reliability indices  
Additional reliability indices are divided into customer-oriented indices and load and energy-oriented indices.

- 2.1. Customer-oriented distribution network reliability indices:

- a) SAIFI, System Average Interruption Frequency Index

where  $f_i$  is the frequency of electric powers supply interruption of the node, i.e. customer point  $i$  (e.g. substations 10/0.4 kV), and  $n_i$  is

potrošača u čvoru. SAIFI predstavlja srednji broj prekida napajanja jednog potrošača.

- b) CAIFI, indeks prosječne učestalosti prekida potrošača (*Customer Average Interruption Frequency Index*)

$$CAIFI = \frac{\text{ukupan broj prekida potrošača}}{\text{ukupan broj pogođenih potrošača}} \left[ \frac{\text{prekida}}{\text{pogođenih potrošača}} \right] \quad (5)$$

- c) SAIDI, indeks prosječnog trajanja prekida sustava (*System Average Interruption Duration Index*)

$$SAIDI = \frac{\sum N_i n_i}{\sum n_i} \left[ \frac{\text{h}}{\text{pot., god.}} \right] \quad (6)$$

gdje je  $N_i$  godišnje vrijeme trajanja prekida napajanja čvora  $i$ . SAIDI predstavlja prosječno zbirno (kumulativno) vrijeme trajanja prekida napajanja jednog potrošača u toku jedne godine.

- d) CAIDI, indeks prosječnog trajanja prekida potrošača (*Customer Average Interruption Duration Index*)

$$CAIDI = \frac{\sum N_i n_i}{\sum f_i n_i} \quad (7)$$

- e) ASAI, indeks prosječne raspoloživosti napajanja (*Average Service Availability Index*)

$$ASAI = \frac{8760 \cdot \sum n_i - \sum N_i n_i}{8760 \cdot \sum n_i} \quad (8)$$

- f) ASUI, indeks prosječne neraspoloživosti napajanja (*Average Service Unavailability Index*)

$$ASUI = 1 - ASAI \quad (9)$$

2.2. Pokazatelji pouzdanosti razdjelnih mreža orijentirani opterećenju i energiji su:

- a) ENS, indeks neisporučene energije (*Energy Not Supplied Index*)

$$ENS = \sum L_i N_i \quad [MWh] \quad (10)$$

gdje je  $L_i$  iznos prosječnog opterećenja priključenog u čvoru  $i$ , a jednak je  $L_i = L_{vi} F_{oi}$ .  $L_{vi}$  i  $F_{oi}$  su vršno opterećenje i faktor opterećenja u čvoru  $i$ .

- b) AENS, indeks prosječno neisporučene energije (*Average Energy Not Supplied Index*)

$$AENS = \frac{\sum L_i N_i}{\sum n_i} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{potrošač, godina}} \right] \quad (11)$$

the number of customers in the node. SAIFI represents the average number of electric power supply interruptions to the customer.

- b) CAIFI, Customer Average Interruption Frequency Index

- c) SAIDI, System Average Interruption Duration Index

where  $N_i$  is the annual electric power supply interruption duration of the node  $i$ . SAIDI represents the average cumulative electric power supply interruption duration of one customer within a period of one year.

- d) CAIDI, Customer Average Interruption Duration Index

- e) ASAI, Average Service Availability Index

- f) ASUI, Average Service Unavailability Index

2.2. Load and energy-oriented distribution network reliability indices:

- a) ENS, Energy Not Supplied Index

where  $L_i$  is the sum of the average load connected to the node  $i$ , and equals  $L_i = L_{vi} F_{oi}$ .  $L_{vi}$  and  $F_{oi}$  are peak load and the load factor in the node  $i$ .

- b) AENS, Average Energy Not Supplied Index

### 3. OPIS I PODACI REALNE DISTRIBUCIJSKE MREŽE

Analize su rađene na primjeru realne distribucijske mreže jednog karakterističnog distribucijskog područja. Područje je karakteristično za obradu jer je dovoljno veliko po veličini mreže, obuhvaća područje mreže sa svim tipovima klime (otočka područja, priobalna područja, kontinentalno-gorska područja), ima zastupljenost svih standardnih tehničkih rješenja elemenata mreže i postrojenja, te ima u potrošnji zastupljenost svih karakterističnih grupa potrošača.

Distribucijsko područje se strukturno sastoji od transformatorskih stanica TS 110/35 kV i TS 110/20(10) kV, mreže 35 kV, mreže 20 kV, mreže 10 kV, mreže 0.4 kV i potrošačkih postrojenja. Početak korištenja električne energije na ovom području je od 1881. godine i najstariji je u Hrvatskoj.

Elektrifikacija i razvoj distribucijske mreže započeo je po koncepciji 110 – 35 – 10 – 0.4 kV, a od početka sedamdesetih godina započeo je proces uvođenja naponske razine 20 kV, odnosno daljnji razvoj mreža po koncepciji 110 – 20 – 0.4 kV. Trenutno stanje uvođenja naponske razine 20 kV je da je veći dio razdjelne mreže na naponskoj razini 20 kV, te da je u postupku prijelaza na 20 kV preostali dio mreže. Distribucijsko područje ima površinu 3574 km<sup>2</sup>, opskrbljuje električnom energijom više od 300.000 stanovnika sa približno 200.000 potrošača (kupaca) električne energije i ostvarenim vršnim opterećenjem od 307,5 MVA [2].

Ekvivalentni model distribucijske mreže za 2006. godinu prikazan je Slikom 1 [2].

Kompleksnost, struktura i broj elemenata mreža i postrojenja, te iznimno značajan rast razvoja potrošnje električne energije iziskuje zahtjevan i osmišljen pristup gospodarenju i ulaganjima u održavanje i razvoj mreže. Ukupna financijska ulaganja u mrežu promatranog područja dijele se u osnovi u dvije skupine:

- troškovi održavanja elektroenergetske mreže (ODR)
- investicijska ulaganja u elektroenergetsku mrežu (INV).

Ukupna financijska ulaganja u mrežu trebaju biti tolika da uz očekivani rast potrošnje električne energije osiguraju sigurnu i pouzdanu opskrbu potrošača kvalitetnom električnom energijom.

Podaci o troškovima održavanja elektroenergetske mreže u razdoblju od 2000. godine do 2006. godine prikazani su u Tablici 1 [3].

### 3. DESCRIPTION AND DATA OF REAL DISTRIBUTION NETWORK

An analysis was conducted based on the example of a real distribution network of one characteristic distribution area. Area is characteristic for processing because it has a large enough network and includes the network area with all climate types (islands, offshore area, and continental-mountain area), all standard technical solutions of network elements and operations are represented, and its consumption represents all characteristic groups of customers.

The distributional area is structurally made of substations TS 110/35 kV and TS 110/20(10) kV, 35 kV network, 20 kV network, 10 kV network, 0.4 kV network and customer operations. The beginning of electrical power usage in this area dates from 1881 and is therefore the oldest in the Republic of Croatia.

Electrification and distribution network development started according to the 110 – 35 – 10 – 0.4 kV concept, and from the beginning of the seventies, the implementation process of 20 kV voltage level started, i.e. further development of networks according to the 110 – 20 – 0.4 kV concept. The current state of implementation of the 20 kV network is such that a greater part of the distribution network is at the 20 kV voltage level, and the remaining part of the network is in the process of transition to 20 kV. The distribution area covers the surface of 3574 km<sup>2</sup>, supplying more than a population of 300.000 with electrical power with approximately 200.000 customers of electrical power and a realized peak load of 307,5 MVA [2].

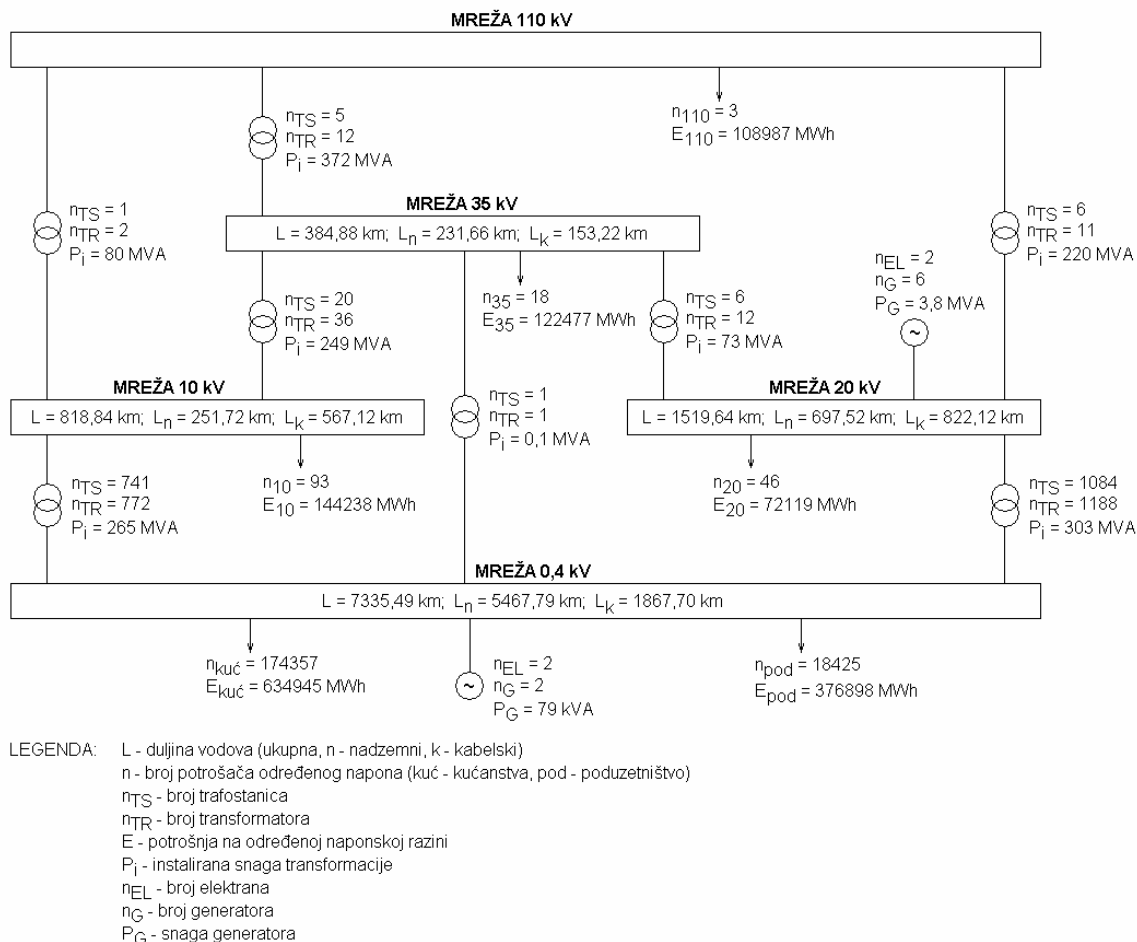
The equivalent model of the distribution network for the year 2006 is shown in Figure 1 [2].

The complexity, structure and number of elements of the network and the operation, as well as the extremely important development growth of electric power consumption requires a demanding and well defined approach to management and investments in network maintenance and development. Total financial investments in the network of the observed area are basically divided in two groups:

- electric power network maintenance expenses (ODR)
- capital investments in the electric power network (INV).

Total financial investments in the network should be such that they ensure safe and reliable supply of the customers with quality electric power even with the expected growth of electric power consumption.

Maintenance expenses data of electric power network in the period from the year 2000 till 2006 are shown in Table 1 [3].



Slika 1. Ekvivalentni model realne distribucijske mreže za 2006. godinu  
 Figure 1. Equivalent model of real distribution network for the year 2006

Tablica 1. Troškovi održavanja (ODR)  
 Table 1. Maintenance expenses

Redni broj Ordinal	Troškovi održavanja Maintenance expenses	Jedinica mjere Measurement unit	2000. g.	2001. g.	2002. g.	2003. g.	2004. g.	2005. g.	2006. g.
1	Materijal i usluge Material and services	kn	13.098.423	12.332.772	16.059.879	15.340.876	18.450.031	18.104.441	15.894.464
2	Troškovi osoblja Personnel expenses	kn	8.330.087	7.915.008	7.390.749	8.840.287	11.039.056	12.864.925	13.158.051
<b>UKUPNO ODRŽAVANJE MAINTENANCE TOTAL</b>		<b>kn</b>	<b>21.428.510</b>	<b>20.247.780</b>	<b>23.450.628</b>	<b>24.181.163</b>	<b>29.489.087</b>	<b>30.969.366</b>	<b>29.052.515</b>

Ubrzani razvoj potrošnje električne energije i vršne snage, zahtjevi za povećanje sigurnosti i pouzdanosti opskrbe, te parametara kvalitete električne energije iziskuje velika investicijska ulaganja u razvoj mreže. U promatranom distribucijskom području ukupna investicijska ulaganja se mogu strukturirati u sljedeće grupe:

- stvaranje tehničkih uvjeta za priključenje novih potrošača

Accelerated development of electrical power consumption and peak power, requirements for the increase of safety and reliability of the supply, and parameters of quality electrical power require great investments in the development of the network. In the observed distribution area we structure total capital investments in the following groups:

- Creation of technical conditions for connection of new customers

- sanacija naponskih prilika i poboljšanje kvalitete opskrbe
- izgradnja kapitalnih objekata iz programa prijelaza na 20 kV naponsku razinu
- ulaganja u nova tehnološka rješenja elemenata mreže i postrojenja.

Ukupna investicijska ulaganja u elektroenergetsku mrežu u razdoblju od 2000. do 2006. godine prikazana su u Tablici 2 [3].

- Recovery of voltage circumstances and improvement of supply quality
- Erection of capital objects from the program of transition to 20 kV voltage level
- Capital investment in new technological solutions of elements of the network and the operation.

Total capital investments in electric power network in the period from the year 2000 till 2006 are shown in Table 2 [3].

Tablica 2. Investicijska ulaganja (INV)

Table 2. Capital investments

Redni broj/ Ordinal	Troškovi investicijskih ulaganja/ Capital investments expenses	Jedinica mjere / Measurement unit	2000. g.	2001. g.	2002. g.	2003. g.	2004. g.	2005. g.	2006. g.
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Priprema investicija Investments preparation	kn	839.152	4.364.052	1.425.540	1.604.325	2.158.389	1.479.873	3.490.736
2	Zamjena i rekonstrukcija Replacement and reconstruction	kn	25.788.810	-3.082.168	10.934.869	13.394.452	18.664.871	31.006.397	16.943.787
3	Revitalizacija energ. objekata Revitalisation of power objects	kn	261.668	18.020	61.525	9.286	748.340	74.701	0
4	Sanacija i obnova rat. šteta Sanation of war damages	kn	0	0	0	0	0	0	0
5	Novi energetske objekti New power objects	kn	9.415.740	17.039.867	35.294.144	42.597.185	53.933.593	26.079.970	21.123.857
6	Ostale investicije Other investments	kn	10.514.253	11.681.973	12.836.919	12.486.026	18.697.030	26.315.459	24.242.686
7	El. energ. uvjeti i priključenja Elect. prerequisites and connections	kn	7.959.985	22.595.524	16.280.756	22.137.735	25.300.111	29.694.864	33.673.783
8	Razvoj Development	kn	0	0	0	409.900	1.024.595	2.224.121	0
<b>UKUPNA INVESTICIJSKA ULAGANJA TOTAL CAPITAL INVESTMENTS</b>		<b>kn</b>	<b>54.779.608</b>	<b>52.617.268</b>	<b>76.833.753</b>	<b>92.638.909</b>	<b>120.526.929</b>	<b>116.875.385</b>	<b>99.474.849</b>

Ukupna financijska ulaganja u elektroenergetsku mrežu promatranog područja u razdoblju od 2000. do 2006. godine prikazana su u Tablici 3 [3].

Total financial investments in the electric power network of the observed area in the period from the year 2000 till 2006 are shown in Table 3 [3].

Tablica 3. Ukupna financijska ulaganja (UFI = INV + ODR)

Table 3. Total financial investments

Redni broj/ Ordinal	Vrsta ulaganja u elektroenergetsku mrežu Type of power network investment	Jedinica mjere / Measurement unit	2000. g.	2001. g.	2002. g.	2003. g.	2004. g.	2005. g.	2006. g.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Investicijska ulaganja Capital investments	kn	54.779.608	52.617.268	76.833.753	92.638.909	120.526.929	116.875.385	99.474.849
2	Troškovi održavanja Maintenance expenses	kn	21.428.510	20.247.780	23.450.628	24.181.163	29.489.087	30.969.366	29.052.515
<b>UKUPNA ULAGANJA TOTAL INVESTMENTS</b>		<b>kn</b>	<b>76.208.118</b>	<b>72.865.048</b>	<b>100.284.381</b>	<b>116.820.072</b>	<b>150.016.016</b>	<b>147.844.751</b>	<b>128.527.364</b>

U promatranom distribucijskom području 2000.-te godine je uspostavljen izvorni sustav praćenja podataka o prekidima napajanja korisnika mreže (kupaca) električnom energijom [4], na način koji omogućuje određivanje i vrednovanje pokazatelja stalnosti napajanja kupaca i pouzdanosti distribucijske mreže. Tim sustavom su obuhvaćeni sljedeći podaci:

- pokazatelji stalnosti napajanja koji se prate (SAIDI, SAIFI, CAIDI, ASAI, ENS, AENS)

In the observed distribution area source system of monitoring data on electric power supply interruptions of network customers was established in the year 2000 [4], in such a way which enables the determination and evaluation of stability indices of the supply of customers and the reliability of the distribution network. This system comprises the following data:

- the electric power supply stability indices which are being monitored (SAIDI, SAIFI, CAIDI, ASAI, ENS, AENS)

- podjela po uzrocima prekida opskrbe (planirani/neplanirani prekidi)
- podjela po naponskim razinama distribucijske mreže ( $\geq 110$  kV, 35 kV, 20 i 10 kV, 0.4 kV)
- podjela po pogonima (područjima) koji se prate

Sklopovska oprema i programska podrška sustava praćenja temelji se na tehničkom informacijskom sustavu (TIS), ORACLE bazi podataka elemenata mreže, mreži radnih stanica u dispečersko-dežurnim poslovima, predobrađi u ORACLE bazi te završnoj tablično-grafičkoj obradi u EXCEL programu. Svi podaci su dokumentirani i arhivirani putem mjesečnih izvješća i u papirnatom obliku.

Kontinuiranim statističkim praćenjem i obradom osnovnih podataka o prekidima napajanja korisnika (kupaca) električnom energijom

- $p$  – broj prekida napajanja u godini dana,
- $N$  – ukupni broj korisnika (kupaca) distribucijske mreže na promatranom području
- $N_i$  – broj korisnika (kupaca) distribucijske mreže bez napajanja tijekom  $i$ -tog prekida
- $t_i$  – trajanje  $i$ -tog prekida

u promatranom distribucijskom području je uspostavljena baza podataka standardnih pokazatelja stalnosti napajanja i pouzdanosti distribucijske mreže, za razdoblje od 2001. do 2006. godine, koji su prikazani tablično. Svi pokazatelji su prikazani u tablicama po godinama, po strukturi mreže, i to ukupno za planirane prekide i neplanirane prekide (kvarove).

AENS)

- distribution according to samples of electric power supply interruptions (planned/unplanned interruptions)
- distribution according to voltage levels of the distribution network ( $\geq 110$  kV, 35 kV, 20 and 10 kV, 0.4 kV)
- distribution according to operations (areas) being monitored

Switching equipment and program support of the monitoring system are based on a technical informational system (TIS), ORACLE database of network elements, network of working stations in dispatching jobs, preprocessing in the ORACLE base and final table-graphic processing in the EXCEL program. All data is documented and archived via monthly reports in paper form.

Continuous statistical monitoring and basic data on electric power supply interruptions of customers processing

- $p$  – number of electric power supply interruptions in a year,
- $N$  – total number of users (customers) of the distribution network in the observed area
- $N_i$  – number of users (customers) of the distribution network without electric power supply during  $i$  interruption
- $t_i$  – duration of  $i$  interruption

in the observed distribution area, a database of standard power supply stability indices, and distribution network reliability are established for the period from 2001 until 2006, which are shown in table form. All indices are shown in tables per year, network structure, and totally for planned interruptions and unplanned interruptions (faults).

Tablica 4. SAIFI – ukupni broj prekida

Table 4. SAIFI – all interruptions

Redni broj Ordinal	Dio elektroenergetske mreže Part of power network	SAIFI – ukupni broj / SAIFI - total					
		2001. g.	2002. g.	2003. g.	2004. g.	2005. g.	2006. g.
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Elektroenergetska mreža 0,4 kV Power network 0.4 kV	0,28	0,2	0,28	0,27	0,27	0,08
2	Elektroenergetska mreža 10(20) kV Power network 10(20) kV	3	2,2	2,98	3,26	2,67	1,68
3	Elektroenergetska mreža 35 kV Power network 35 kV	0,3	1,3	0,53	0,83	0,71	0,31
4	Prijenosna mreža ( $\geq 110$ kV) Transmission network ( $\geq 110$ kV)	0,92	1,4	0,97	2,85	1	0,46
5	<b>Ukupno distr. mreža</b> <b>Distribution network total</b>	<b>3,58</b>	<b>3,7</b>	<b>3,79</b>	<b>4,36</b>	<b>3,65</b>	<b>2,07</b>

Tablica 5. SAIDI – ukupni broj prekida

Table 5. SAIDI – all interruptions

Redni broj Ordinal	Dio elektroenergetske mreže Part of power network	SAIDI – ukupni broj (min) / SAIDI – total (min)					
		2001. g.	2002. g.	2003. g.	2004. g.	2005. g.	2006. g.
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Elektroenergetska mreža 0,4 kV Power network 0.4 kV	22	33	40	49	37	11
2	Elektroenergetska mreža 10(20) kV Power network 10(20) kV	353	213	314	282	229	170
3	Elektroenergetska mreža 35 kV Power network 35 kV	10	43	29	54	21	21
4	Prijenosna mreža (≥110 kV) Transmission network (≥110 kV)	4	18	36	112	58	10
5	<b>Ukupno distr. mreža</b> <b>Distribution network total</b>	<b>385</b>	<b>289</b>	<b>383</b>	<b>385</b>	<b>287</b>	<b>202</b>

Tablica 6. ENS – ukupni broj prekida

Table 6. ENS – all interruptions

Redni broj Ordinal	Dio elektroenergetske mreže Part of power network	ENS – ukupno (MWh) / ENS – total (MWh)					
		2001. g.	2002. g.	2003. g.	2004. g.	2005. g.	2006. g.
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Elektroenergetska mreža 0,4 kV Power network 0.4 kV	134	157	189	191	209	62
2	Elektroenergetska mreža 10(20) kV Power network 10(20) kV	1911	986	1395	1369	1020	648
3	Elektroenergetska mreža 35 kV Power network 35 kV	60	208	116	860	119	61
4	Prijenosna mreža (≥110 kV) Transmission network (≥110 kV)	5	82	122	221	150	57
5	<b>Ukupno distr. mreža</b> <b>Distribution network total</b>	<b>2105</b>	<b>1351</b>	<b>1700</b>	<b>2420</b>	<b>1348</b>	<b>771</b>

Tablica 7. AENS – ukupni broj prekida

Table 7. AENS – all interruptions

Redni broj Ordinal	Dio elektroenergetske mreže Part of power network	AENS – ukupno (kWh) / AENS – total (kWh)					
		2001. g.	2002. g.	2003. g.	2004. g.	2005. g.	2006. g.
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Elektroenergetska mreža 0,4 kV Power network 0.4 kV	0,8	0,87	1	1	1,1	0,34
2	Elektroenergetska mreža 10(20) kV Power network 10(20) kV	11	5,48	7,7	7,4	5,5	3,47
3	Elektroenergetska mreža 35 kV Power network 35 kV	0,3	1,16	0,64	4,6	0,6	0,33
4	Prijenosna mreža (≥110 kV) Transmission network (≥110 kV)	0	0,46	0,67	1,2	0,8	0,29
5	<b>Ukupno distr. mreža</b> <b>Distribution network total</b>	<b>12,1</b>	<b>7,51</b>	<b>9,34</b>	<b>13</b>	<b>7,2</b>	<b>4,14</b>

#### 4. APROKSIMACIJA SKUPA VRIJEDNOSTI POKAZATELJA PRAVCEM

Istraživanje utjecaja i ovisnosti pokazatelja pouzdanosti rađena su statističkim pristupom obrade rezultata pokazatelja pouzdanosti i ovisnih veličina u prošlosti, te projiciranjem njihovog kretanja u budućnosti. Temelj za takve obrade je linearno nadomještanje stvarnih rezultata nadomjesnim pravcem, a za što je matematička podloga prikazana u nastavku.

Potrebno je pronaći jednadžbu pravca koja najbolje opisuje zadani skup od  $N$  točaka. Opći oblik jednadžbe pravca je

#### 4. APPROXIMATION OF INDEX VALUES SET ON THE LINE

Research on the influence and dependency of reliability indices is conducted via the statistical approach of the reliability index results processing and dependant values in the past, as well as via projection of their movements in the future. The basis for such processing is linear compensation of real results with a substitute line, and the mathematical background for it is shown below.

It is necessary to find an equation of a line which describes the default set of  $N$  points in the best way. The common form of the equation of a line is

$$y = f(x) = Ax + B \quad (12)$$



Mjera odstupanja pravca od zadanih točaka može se izraziti kao

$$E = \sum_{i=1}^N (f(x_i) - y_i)^2 \quad (13)$$

Uvrštavanjem (12) u (13) dobije se

$$E = \sum_{i=1}^N (Ax_i + B - y_i)^2 \quad (14)$$

Da bi se pronašao minimum udaljenosti, moraju biti ispunjena dva uvjeta:

$$\frac{\partial E}{\partial A} = 0 \quad \text{i} \quad \frac{\partial E}{\partial B} = 0 \quad (15)$$

Derivacija jednadžbe (14) po prvom parametru je

$$\frac{\partial E}{\partial A} = \sum_{i=1}^N 2x_i(Ax_i + B - y_i) = 2 \sum_{i=1}^N (Ax_i^2 + Bx_i - x_i y_i) \quad (16)$$

Uvjet (15) za parametar  $A$  sada postaje:

$$2 \sum_{i=1}^N (Ax_i^2 + Bx_i - x_i y_i) = 0 \Rightarrow A \sum_{i=1}^N x_i^2 + B \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N x_i y_i \quad (17)$$

Derivacija jednadžbe (14) po drugom parametru je

$$\frac{\partial E}{\partial B} = 2 \sum_{i=1}^N (Ax_i + B - y_i) \quad (18)$$

Uvjet (15) za parametar  $B$  se može napisati u obliku:

$$2 \sum_{i=1}^N (Ax_i + B - y_i) = 0 \Rightarrow A \sum_{i=1}^N x_i + \sum_{i=1}^N B = \sum_{i=1}^N y_i \Rightarrow A \sum_{i=1}^N x_i + N \cdot B = \sum_{i=1}^N y_i \quad (19)$$

Ako se uvedu oznake

$$K_1 = \sum_{i=1}^N x_i^2, \quad K_2 = \sum_{i=1}^N x_i, \quad K_3 = \sum_{i=1}^N x_i y_i, \quad K_4 = \sum_{i=1}^N y_i \quad (20)$$

jednadžbe (17) i (19) postaju

$$K_1 A + K_2 B = K_3 \quad (21)$$

$$K_2 A + NB = K_4 \quad (22)$$

Iz jednadžbe (22) se dobije

$$B = \frac{K_4 - K_2 A}{N} \quad (23)$$

Uvrštavanjem (23) u (21) slijedi

$$K_1 A + \frac{K_2 K_4 - K_2^2 A}{N} = K_3 \Rightarrow NK_1 A + K_2 K_4 - K_2^2 A = NK_3 \Rightarrow A = \frac{NK_3 - K_2 K_4}{NK_1 - K_2^2} \quad (24)$$

Algoritam za određivanje jednadžbe nadomjesnog pravca skupa podataka od  $N$  točaka je sljedeći:

1. Zadan je skup od  $N$  točaka  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1 \dots N$
2. Odrediti parametre  $K_1, K_2, K_3$  i  $K_4$  prema (20)

The deviation measure of a line from the default points can be expressed as

By inserting (12) into (13) we get

In order to find the minimum distance, two conditions must be fulfilled

The equation derivation (14) according to the first parameter is

The condition (15) for parameter  $A$  becomes

The equation derivation (14) according to the second parameter is

The condition (15) for parameter  $B$  can be written as

If you insert the symbols

equations (17) and (19) become

From equation (22) we get

By insertion of (23) into (21) follows

The algorithm for equation determination of the substitute line of data set made of  $N$  points is as follows:

1. Given is the set of  $N$  points  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1 \dots N$
2. Determine the parameters  $K_1, K_2, K_3$  and  $K_4$  according

3. Izračunati koeficijent  $A$  prema (24)
4. Izračunati koeficijent  $B$  prema (23)
5. Traženi pravac je određen jednačbom (12)

### 5. OVISNOST POKAZATELJA SAIFI, SAIDI, ENS I AENS ZA UKUPNI BROJ PREKIDA O ULAGANJIMA U MREŽU

Provedenim istraživanjima primarno je bio cilj utvrditi korelacijske ovisnosti pouzdanosti odnosno pokazatelja pouzdanosti distribucijske mreže i financijskih ulaganja u razvoj i izgradnju distribucijske mreže. Statističkom obradom dostupnih podataka za razdoblje 2000.-2006. godine utvrđeno je kretanje i ovisnost u prošlosti, temeljem kojih se može matematički opisati korelacijska ovisnost.

Ovisnosti pokazatelja pouzdanosti za ukupni broj prekida (planirani + neplanirani) promatrane distribucijske mreže o ukupnim ulaganjima u mrežu (investicijska ulaganja INV + troškovi održavanja ODR) prikazane su na Slikama 2. do 5., na kojima se vidi kvantificirana ovisnost pokazatelja pouzdanosti o financijskim ulaganjima u razvoj mreže.

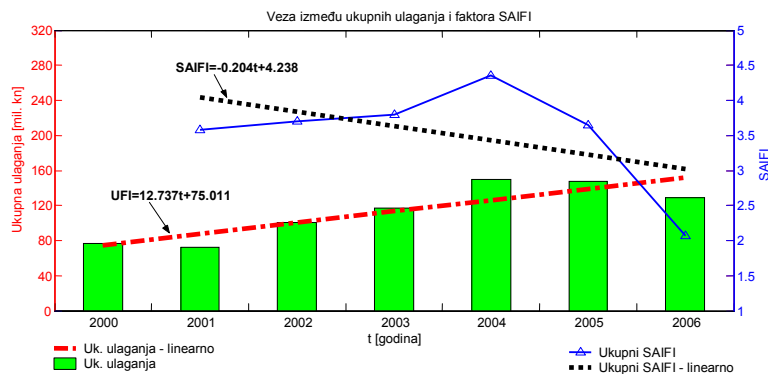
to (20)

3. Calculate the coefficient  $A$  according to (24)
4. Calculate the coefficient  $B$  according to (23)
5. The requested line is determined by equation (12)

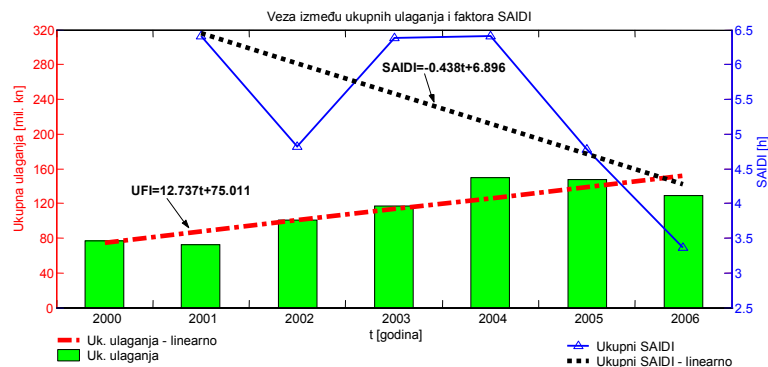
### 5. DEPENDENCE OF INDICES SAIFI, SAIDI, ENS AND AENS FOR THE TOTAL NUMBER OF INTERRUPTIONS ON INVESTMENTS IN THE NETWORK

Conducted research has had the primary goal of determining the correlational reliability dependencies, i.e. the reliability indices of the distribution network and the financial investments in the development and construction of the distribution network. Statistical processing of the available data for the period from 2000-2006 determined movements and dependencies in the past, based on which it is possible to mathematically describe the correlational dependency.

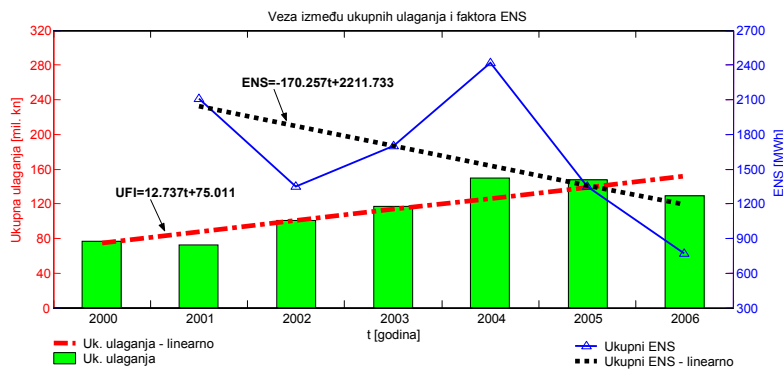
The reliability index dependency for the total number of interruptions (planned + unplanned) of the observed distribution network on total investments in the network (capital investments INV + maintenance expenses ODR) are shown in Figures 2. to 5., which show the quantity dependency of reliability indices on financial investments in network development



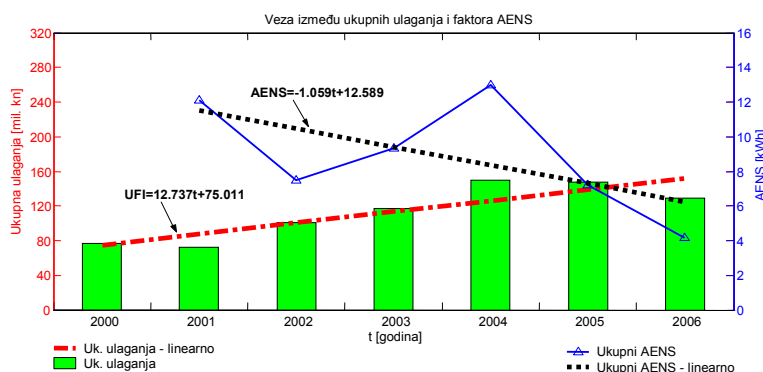
Slika 2. Ovisnost pokazatelja SAIFI o ukupnim ulaganjima  
Figure 2. Dependency of SAIFI index on total investments



Slika 3. Ovisnost pokazatelja SAIDI o ukupnim ulaganjima  
Figure 3. Dependency of SAIDI index on total investments



Slika 4. Ovisnost pokazatelja ENS o ukupnim ulaganjima  
 Figure 4. Dependency of ENS index on total investments



Slika 5. Ovisnost pokazatelja AENS o ukupnim ulaganjima  
 Figure 5. Dependency of AENS index on total investments

6. ZAKLJUČAK

Osnovna zadaća operatora distribucijskog sustava je planiranje i razvoj mreže, temeljen na očekivanom rastu potrošnje električne energije i snage, kroz kontinuiranu izgradnju novih i održavanje postojećih elemenata mreže. Izgradnja i održavanje distribucijske mreže treba biti planirana kriterijima koji jamče traženu razinu kvalitete opskrbe električnom energijom. Za takvo planiranje potrebnih financijskih ulaganja u distribucijsku mrežu, ključna je ovisnost pokazatelja pouzdanosti o razini i dinamici financijskih ulaganja. U ovom radu je, temeljem statističke obrade podataka jedne realne distribucijske mreže, utvrđena korelacijska ovisnost pokazatelja pouzdanosti i ukupnih financijskih ulaganja, prikazana u Tablici 7.

6. CONCLUSION

The main task of the distribution system operator is the planning and development of the network, based on the expected growth of electric power and energy consumption, through the continuous construction of new network elements and the maintenance of the existing network elements. Construction and maintenance of the distribution network has to be planned according to criteria which guarantee the quality of the electric power supply level. For such planning of required financial investments in the distribution network, of crucial importance is the reliability index dependency on the level and dynamics of financial investments. This paper has defined the correlational dependency of the reliability index and the total financial investments, shown in Table 7., based on the processing of statistical data from a real distribution network.

Tablica 7. Korelacijska ovisnost pokazatelja pouzdanosti i ukupnih financijskih ulaganja  
 Table 7. Correlational dependency of reliability indices and total financial investments

Ukupna financijska ulaganja Total financial investments	Pokazatelj pouzdanosti Reliability index
$UFI = 12,737 \cdot t + 75,011$	$SAIFI = -0,204 \cdot t + 4,238$
	$SAIDI = -0,438 \cdot t + 6,896$
	$ENS = -170,257 \cdot t + 2211,733$
	$AENS = -1,059 \cdot t + 12,589$

Utvrđena ovisnost definira kvantificirano poboljšanje pokazatelja pouzdanosti sa ukupnim financijskim ulaganjima u mrežu, i omogućuje planiranje dinamike i razine ulaganja za postizanje određene razine pouzdanosti mreže.

Determined dependency defines the quantified improvement of the reliability indices with total financial investments in the network, and enables dynamics planning and investment levels for the achievement of a certain reliability level of the network.

## 7. POPIS OZNAKA

srednja frekvencija kvara	$f_s$
srednje vrijeme trajanja kvara	$r_s$
neraspoloživost mreže	$N_s$
frekvencija prekida napajanja čvora	$f_i$
broj potrošača u čvoru	$n_i$
godišnje vrijeme trajanja prekida čvora	$N_i$
prosječno opterećenje čvora	$L_i$
mjera odstupanja pravca od zadanih točaka	$E$

## 7. LIST OF SYMBOLS

medium frequency of the fault
medium duration of the fault
unavailability of the network
frequency of the power supply interruption of the node
number of customers in the node
annual duration of node interruption
average node load
direction deviation measure form default points

## LITERATURA REFERENCES

- [1] Brown R. E.: Electric Power Distribution Reliability, Marcel Dekker Inc., New York, 2002.
- [2] Temeljni podaci (statistički ljetopis), HEP-ODS (Distribucija) d.o.o. / DP Elektroprimorje Rijeka za 2000., 2001., 2002., 2003., 2004., 2005. i 2006. god.

- [3] Izvještaj o poslovanju HEP-ODS (Distribucija) d.o.o. / DP Elektroprimorje Rijeka za 2000., 2001., 2002., 2003., 2004., 2005. i 2006. god.
- [4] Komen V., Krstulja B.: Praćenje pokazatelja kvalitete opskrbe električnom energijom na području Elektroprimorja Rijeka, stručni časopis Energija br. 4/2004., str. 271.-281., Zagreb, 2004.

Primljeno / Received: 21.2.2008

Prihvaćeno / Accepted: 23.6.2008

Izvornoznanstveni članak

Original scientific paper

Adresa autora / Authors' address:  
v. pred. dr. sc. Vitomir Komen, dipl. ing. el.  
Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet  
Vukovarska 58  
51000 Rijeka  
HRVATSKA  
vitomir.komen@hep.hr

prof. dr. sc. Slavko Krajcar, dipl. ing. el.  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Sveučilište u Zagrebu  
Unska 3  
10000 Zagreb  
HRVATSKA  
slavko.krajcar@fer.hr