

# Verjetnostna kratkoročna napoved prenosnih izgub z uporabo Hongove dvotočkovne ocenjevalne metode

Matej Rejc<sup>1</sup>, Miloš Pantoš<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: matej.rejc@fe.uni-lj.si, milos.pantos@fe.uni-lj.si

**Povzetek.** Sistemski operaterji prenosnega omrežja so z izvajanjem sistemskih storitev zadolženi za zakup energije za kritje prenosnih izgub. Zakup te energije ponavadi izvajajo na letni, mesečni in dnevni ravni. Ker zakup energije za daljše obdobje ne zadostuje nihanjem na dnevni ravni, je hitra in natančna kratkoročna napoved prenosnih izgub bistvenega pomena za ekonomično obratovanje sistema. V ta namen v članku predstavljamo metodo napovedi izgub, ki upošteva glavne vplivne dejavnike na izgube prek izračuna pretokov moči, ki so: poraba v sistemu, proizvodnja, prehod moči prek sistema in topologija omrežja. Zaradi negotovosti obratovanja in nelinearne narave elektroenergetskega sistema deterministične napovedi prenosnih izgub ne podajo zadostnih informacij o vplivu morebitnih sprememb porabe, proizvodnje in prehodov moči na prenosne izgube. V ta namen predstavljamo verjetnostni način napovedi izgub z uporabo Hongove točkovne ocenjevalne metode, ki kot rezultat poda verjetnostno porazdelitev napovedanih izgub. Uporaba Hongove točkovne ocenjevalne metode pomeni pohitritev izračunov v primerjavi z uporabo klasične metode Monte Carlo. S tem se lahko sistemski operater prenosnega omrežja odloči o najučinkovitejši strategiji zakupa energije za kritje izgub na dnevnem trgu. Članek predstavlja podroben opis metode za napoved izgub, ki zajema napoved porabe, proizvodnje, prehodov moči in topologije omrežja ter verjetnostni izračun pretokov moči. V članku podajamo teorijo uporabljene Hongove točkovne ocenjevalne metode, računski postopek za verjetnostno napoved izgub in rezultate uporabe predlagane metode.

**Ključne besede:** dvotočkovna ocenjevalna metoda, kratkoročna napoved izgub, kratkoročna napoved porabe, verjetnostni izračun pretokov moči

## Probabilistic Short-term Transmission-loss Forecasting Based on the Hong's Two-point Estimate Method

**Extended abstract.** In Europe, the electricity supply industry has been evolving towards a market-based approach over the last few decades and transmission system operators have started adding ancillary services as commodities to be procured and compensated in the electricity market. Ancillary services are defined as services essential for the functioning of electric power systems and may among other services include compensation of active-power losses [1], [2]. These losses must be compensated by the transmission system operator, which is most often done as yearly, monthly and daily energy volume purchases [2],[3]. Under the new market-based conditions transmission system operators have been under considerable economic pressure to improve efficiency and reduce costs while the electricity market participants' behavior has become somewhat unpredictable. This requires the use of accurate and fast forecasting tools to forecast the active-power losses.

This paper presents a novel short-term active power loss forecast method that considers the nonlinear nature of active-power losses and its impact factors, i.e. system loading conditions (load and generation), power transits and network topology. These system conditions define power flows and the resulting active-power losses throughout the network. For this reason, the method uses multiple linear regression for system loading and power transit forecast while network configuration changes are forecasted by following maintenance schedules and day-to-day system operation status. The system loading forecasts are translated into power

flow model state forecasts, i.e. forecasted power-flow model nodal injections, which can be followed by an AC power flow and resulting transmission loss calculations for the day-ahead on an hourly basis. However the uncertainty of electric loads, generation commitment, and inherent nonlinearities in power systems, operational changes and errors in the forecasting procedure may cause the transmission loss forecasts to give inaccurate results. By using deterministic forecasts no additional information as to the possible deviations in the forecast accuracy can be given as there is no clear correlation with these uncertainties. To account for these uncertainties in the short-term loss forecast procedure, a probabilistic power-flow analysis is made by using Hong's  $2n+1$  point-estimate method [4]-[7], thus defining the probability distribution of the forecasted losses which may help system operators to minimize costs of ancillary services.

The main idea behind point estimate methods is to use approximate formulas to concentrate the statistical information provided by the first few central moments of  $n$  random variables, i.e. forecasted nodal injections, on different deterministic points for each variable. By using these points the moments of the output variables, i.e. transmission losses are computed by using deterministic power flows. Specifically, the  $2n+1$  point estimate method requires  $2n+1$  deterministic power flow calculations, as opposed to the more accurate Monte Carlo simulation, which is computationally more demanding and time consuming [7].

**Keywords:** Two-point estimate method, probabilistic power flow, short-term load forecast, short-term loss forecast, uncertainty

## 1 Uvod

Liberalizacija trga električne energije je na področju elektroenergetike prinesla večje spremembe pri zagotavljanju sistemskih storitev sistemskega operaterja prenosnega omrežja (SO). Sistemske storitve so tako postale tržno blago in SO so postali zavezani zagotavljati ustrezno kompenzacijo stroškov nekaterih sistemskih storitev [1], [2]. Ena teh storitev je zakup energije za kritje prenosnih izgub, ki se najpogosteje izvaja na letni, mesečni in dnevni ravni [2], [3]. Ker nakup energije za dolgo obdobje ne zadostuje vsem dnevnim potrebam, je ključna hitra in natančna kratkotrajna napoved izgub. Z njo se SO omogoča ustrezen nastop na dnevnem trgu za zakup energije.

V članku predstavljamo metodo kratkoročne napovedi izgub, ki upošteva glavne vplivne dejavnike na prenosne izgube, ki so: poraba v sistemu, proizvodnja, prehodi moči prek sistema in topologija elektroenergetskega omrežja (EEO). Našteti vplivni dejavniki definirajo pretoke moči v EES in posledično izgube, zato z uporabo predstavljene metode posredno prek napovedi vplivnih dejavnikov in izračuna pretokov moči napovemo prenosne izgube. Za kratkoročne napovedi porabe, proizvodnje in prehodov moči uporabljamo večkratno linearno regresijo. Napoved topologije EEO izvedemo skladno z načrtovanimi remontni elementov ter sprotimi obratovnimi spremembami. Te napovedi vnesemo v model EES za izračun pretokov moči, čemur sledita deterministična rešitev izračuna pretokov moči in napoved prenosnih izgub.

Zaradi negotovosti obnašanja EES (negotovost porabe, negotovost razpoložljivosti proizvodnje, neznani vplivi netočnosti modela ipd.) lahko napoved izgub odstopa od dejanskih. Z uporabo determinističnih izračunov ni mogoče pridobiti podrobnih informacij o morebitnih odstopanjih napovedi izgub, saj nelinearnost in velikost EES otežuje določitev točnih korelacij omenjenih negotovosti. Za to je treba za zajetje negotovosti izvesti veliko število determinističnih izračunov, kar pomeni časovno zamuden postopek.

Za upoštevanje negotovosti predstavljamo uporabo verjetnostnih izračunov pretokov moči z uporabo Hongove  $2n+1$  točkovne ocenjevalne metode, ki kot rezultat definira verjetnostno porazdelitev napovedanih izgub [4]-[7].

Glavna ideja točkovnih ocenjevalnih metod je uporaba statističnih informacij vhodnih naključnih spremenljivk (npr. disperzija ocenjene napake pri preteklih napovedih porabe po posameznih vozliščih), s katerimi se izračuna verjetnostna porazdelitev izhodnih naključnih spremenljivk (prenosnih izgub) z uporabo determinističnih izračunov pretokov moči. Uporabljena metoda zahteva samo  $2n+1$  determinističnih izračunov pretokov moči, kjer je  $n$  enako število vhodnih naključnih spremenljivk (število napovedanih injekcij v

EES) v nasprotju z računsko precej zahtevnejšo in časovno potratno metodo Monte Carlo [7].

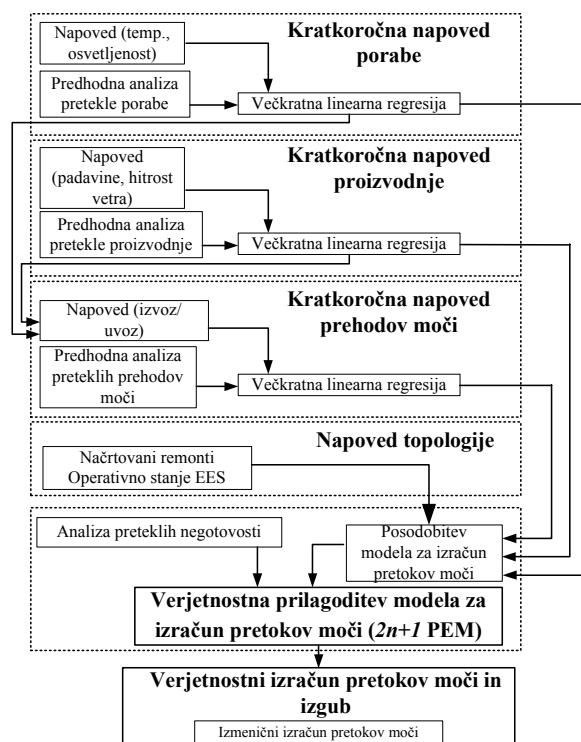
Z verjetnostno napovedjo prenosnih izgub se SO ustrezno odloči o strategiji nakupa energije za kritje izgub na dnevni ravni.

## 2 Metodologija napovedi prenosnih izgub

Prenosne izgube (delovne moči) so funkcija številnih dejavnikov, med katerimi je zaradi nelinearnosti sistema težko poiskati soodvisnosti. Na splošno so odvisne od:

- obremenitve sistema, ki so odvisne od letnega časa in dela dneva ter vremenskih razmer in cene električne energije;
- proizvodnje moči, ki glede na tržne pogodbe uravnoveša porabo;
- topologije omrežja;
- prehodov moči prek opazovanega EES.

Predstavljena kratkoročna napoved izgub upošteva glavne vplivne dejavnike na prenosne izgube in negotovosti, ki nastajajo pri napovedi izgub.



Slika 1: Diagram poteka metode verjetnostne napovedi prenosnih izgub

Figure 1. Flow chart for the probabilistic transmission losses forecast method.

V prvem koraku metode izvedemo kratkoročno napoved porabe, proizvodnje in prehodov moči. V ta namen smo uporabili večkratno linearno regresijo, s katero določimo povezavo med omenjenimi veličinami in njihovimi vplivnimi dejavniki. Napoved porabe in

proizvodnje izvedemo tako za opazovan (domač) sistem, kot za tuje sisteme v interkonekciji. Te napovedi nam se uporabljajo za napoved prehodov moči prek opazovanega sistema. Dodatno skladno z načrti remontov elementov EEO in operativnim stanjem napovemo topologijo za dan naprej. Pri tem lahko upoštevamo topologijo tujih sistemov pri izklopih pomembnih interkonekcijskih vodov v interkonekciji.

V naslednjem koraku vnesemo napovedi v model za izračun pretokov moči, kjer napovedano porabo in proizvodnjo razporedimo po ustreznih vozliščih, napovedane prehode moči definiramo kot injekcije mejnih vozlišč in topologijo modela prilagodimo glede na napoved.

Temu sledimo z verjetnostno prilagoditvijo modela za izračun pretokov moči skladno z verjetnostnimi porazdelitvami vhodnih naključnih spremenljivk, to so napovedane injekcije moči. Verjetnostne porazdelitve vhodnih naključnih spremenljivk definiramo skladno z analizo preteklih negotovosti napovedovanja. Verjetnostne porazdelitve vhodnih naključnih spremenljivk uporabljamo za verjetnostni izračun pretokov moči z uporabo Hongove točkovne ocenjevalne metode  $2n+1$ . Rezultat verjetnostnih izračunov pretokov moči definira verjetnostno napoved izgub.

Metodo za verjetnostno napoved prenosnih izgub smo podrobneje opisali v naslednjih podglavjih.

### 2.1 Predanaliza vhodnih podatkov

Kratkoročno napoved začnemo s predanalizo vhodnih podatkov, kjer klasificiramo obremenitvene diagrame v tipične razrede, določene s sezono in tipom dneva. Ločimo štiri sezone: zima, pomlad, poletje in jesen ter pet tipov dni: ponedeljki, toriki – četrčki, petki ter sobote, nedelje in prazniki. Razlog za klasifikacijo obremenitvenih diagramov po sezonah so bistvene razlike v načinu obratovanja v posamezni sezoni. Kot primer sezonskega vpliva lahko omenimo premik konice porabe in spremembo vplivnih dejavnikov, npr. vklopi klimatskih naprav v poletnem obdobju povzročijo bistveno drugačno obliko obremenitvenih diagramov kot v zimskem obdobju in posledično ima temperatura bistveno drugačen vpliv na porabo kot v zimskem obdobju. Razlog za klasifikacijo različnih tipov dni so razlike v vedenju odjemalcev med različnimi tipi dni, npr. ponedeljki in petki so zaradi bližine konca tedna drugačni kot torek-četrtek [8].

S tem odstranimo dneve, ki bi zaradi svojih različnosti podali napačne signale pri napovedi.

### 2.2 Kratkoročna napoved porabe

Predstavljena metoda za kratkoročno napoved porabe uporablja večkratno linearno regresijo. Je eno najpogosteje uporabljenih metod za napoved porabe in določi linearno povezavo med neodvisnimi

spremenljivkami [9],[10], npr. temperaturo, in odvisno spremenljivko, npr. porabo. Za kratkoročno napoved smo v članku uporabili naslednji neodvisni spremenljivki:

- urna temperatura,
- urna osvetljenost.

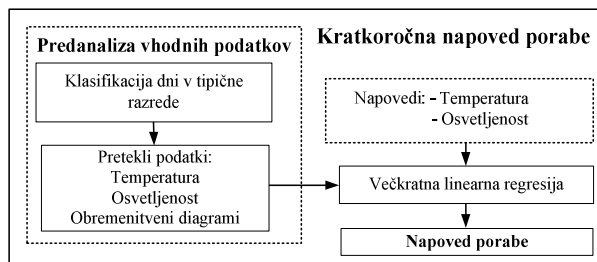
Model večkratne linearne regresije za napoved porabe zapišemo kot linearno funkcijo neodvisnih spremenljivk in regresijskih koeficientov:

$$\mathbf{x}_{s,d,(.)h} = a_{s,d,h} + b_{s,d,h} \cdot \mathbf{T}_{s,d,(.)h} + c_{s,d,h} \cdot \mathbf{O}_{s,d,(.)h} + \boldsymbol{\varepsilon}_{s,d,(.)h}, \quad (1)$$

kjer je  $\mathbf{x}_{s,d,(.)h} = [x_{s,d,1,h}, x_{s,d,2,h}, \dots, x_{s,d,e,h}, \dots, x_{s,d,SE,h}]^T$  vektor *SE* obremenitev v sezoni *s*, dnevnem tipu *d* za uro *h*. *SE* je število obravnavanih obremenitvenih diagramov za obravnavano sezono *s* in dnevnem tipu *d*. Koeficienti  $a_{s,d,h}$ ,  $b_{s,d,h}$  in  $c_{s,d,h}$  so konstantni regresijski koeficient, regresijski koeficient temperature in regresijski koeficient osvetljenosti.  $\mathbf{T}_{s,d,(.)h} = [T_{s,d,1,h}, T_{s,d,2,h}, \dots, T_{s,d,e,h}, \dots, T_{s,d,SE,h}]^T$  je vektor vseh *SE* temperatur v sezoni *s*, dnevnem tipu *d* in uri *h*.  $\mathbf{O}_{s,d,(.)h} = [O_{s,d,1,h}, O_{s,d,2,h}, \dots, O_{s,d,e,h}, \dots, O_{s,d,SE,h}]^T$  je vektor vseh *SE* osvetljenosti v sezoni *s*, dnevnem tipu *d* in uri *h*. Vektor  $\boldsymbol{\varepsilon}_{s,d,(.)h} = [\varepsilon_{s,d,1,h}, \varepsilon_{s,d,2,h}, \dots, \varepsilon_{s,d,e,h}, \dots, \varepsilon_{s,d,SE,h}]^T$  je sestavljen iz vseh *SE* naključnih pogreškov v sezoni *s*, dnevnem tipu *d* in uri *h*.

Z uporabo metode najmanjših kvadratov minimiziramo vektor naključnih pogreškov za določitev regresijskih koeficientov na podlagi preteklih podatkov. S tem lahko pri napovedi vektor  $\boldsymbol{\varepsilon}$  zanemarimo. Po določitvi koeficientov se napove poraba  $x_{s,d,NE+1,h}$  za uro *h* za dan napovedi *SE+1*, sezono *s* in tip dneva *d*:

$$x_{s,d,NE+1,h} = a_{s,d,h} + b_{s,d,h} T_{s,d,SE+1,h} + c_{s,d,h} O_{s,d,SE+1,h} \quad (2)$$



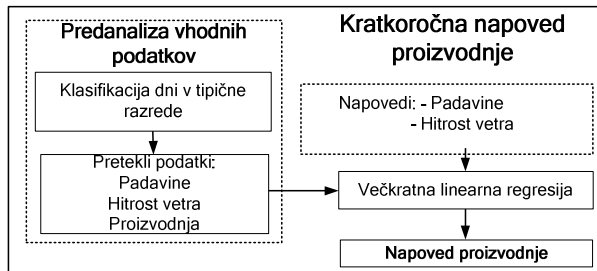
Slika 2: Diagram poteka kratkoročne napovedi porabe  
Figure 2. Flow chart for the short-term load forecast.

### 2.3 Kratkoročna napoved proizvodnje

Kratkoročno napoved proizvodnje izvedemo na enak način kot napoved porabe, ki je opisana v poglavju 2.2. Zaradi pomanjkljivih informacij o tržnih pogodbah posameznih proizvajalcev smo v članku kot neodvisne spremenljivke uporabili:

- urne padavine za območja z večjim deležem hidroelektrarn,
- hitrosti vetra za območja z večjim deležem vetrnih elektrarn.

Za območja s poznanimi značilnostmi proizvodnih enot, kot je domači EES, smo napovedi izvajali po posameznih enotah in ne združene kot porabo.



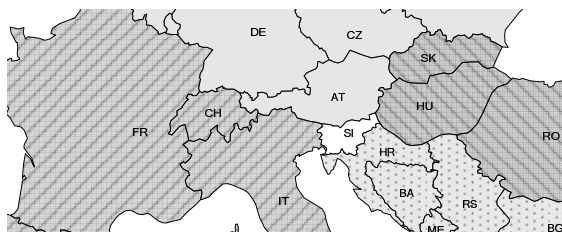
Slika 2: Diagram poteka kratkoročne napovedi porabe  
Figure 2. Flow chart for the short-term load forecast.

## 2.4 Kratkoročna napoved prehodov moči

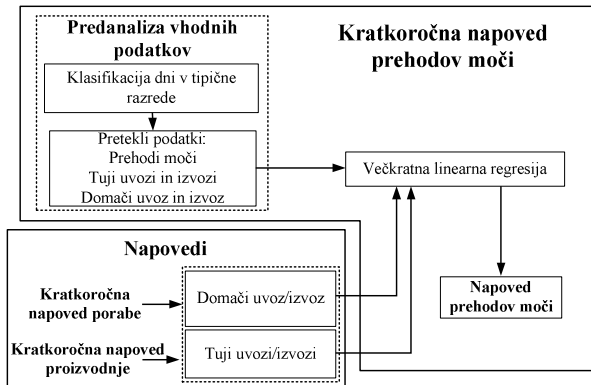
Prehodi moči, ki so posledica prenašanja moči med sosednjimi sistemi, so pomemben vplivni dejavnik na prenosne izgube. Napoved prehodov moči izvajamo na enak način kot napoved porabe, ki je predstavljena v poglavju 2.2. Neodvisne spremenljivke so v tem primeru:

- uvoz in izvoz energije tujih sistemov v interkonekciji,
- uvoz in izvoz energije domačega sistema.

Potrebne napovedi zgornjih neodvisnih spremenljivk smo napovedali z uporabo kratkoročne napovedi porabe in proizvodnje. Uvoze in izvoze energije za tuje sisteme smo združili v štiri večja geografska območja. Razdelili smo jih na območja severno, vzhodno, zahodno in južno od opazovanega domačega sistema, kar nam je omogočilo zmanjšati število vhodnih neodvisnih spremenljivk pri uporabi večkratne linearne regresije, slika 3.



Slika 3: Prikaz združenih geografskih območij  
Figure 3. Aggregated regions bordering on the domestic power system.



Slika 4: Diagram poteka kratkoročne napovedi prehodov moči  
Figure 4. Flow chart for the short-term power transit forecast.

## 2.5 Napoved topologije omrežja

Izklop elementa EEO lahko povzroči večje preusmeritve pretokov moči, kar lahko močno vpliva na izgube. Napoved topologije EEO smo izvedli skladno z načrti remontov elementov EEO, obratovalnim stanjem in pričakovanimi spremembami EEO. Te spremembe smo upoštevali v modelu za izračun pretokov moči.

## 2.6 Posodobitev modela za izračun pretokov moči

Naslednji korak pri napovedi izgub je posodobitev modela za izračun pretokov moči. Model za izračun pretokov moči sestavljajo opazovano EES in mejna vozlišča, ki povezujejo sistem s preostalo interkonekcijo. Model skladno z napovedjo posodobimo za vsako uro  $h \in [1, 2, \dots, 24]$  za dan napovedi. Napovedano porabo proporcionalno razporedimo po vozliščih glede na pretekle vozliščne obremenitve enakega tipa dneva in sezone. Napovedi proizvodnje in prehodov moči podamo v ustrezna proizvodna vozlišča oz. v ustrezna mejna vozlišča. Prehode moči v modelu definiramo kot ustrezno injekcijo moči v mejnem vozlišču.

## 2.7 Verjetnostna napoved prenosnih izgub

Negotovosti obratovanja EES in negotovosti pri napovedovanju se ne odražajo neposredno na napovedi prenosnih izgub zaradi nelinearnosti in velikosti EES. Zato je treba upoštevati velik spekter verjetnih sprememb porabe, proizvodnje in prehodov moči. Z uporabo determinističnih izračunov potrebujemo veliko število izračunov za zajetje vseh verjetnih sprememb in dogodkov, kar je časovno zamudno. S tega vidika se je pokazalo, da je primeren verjetnostni način reševanja opisanega problema.

Za verjetnostne izračune se v praksi pogosto uporablja metoda Monte Carlo, ki je ponavljajoči se proces generiranja determinističnih rešitev danemu problemu. Z naključno izbiro determinističnih vrednosti vhodnih ključnih spremenljivk dobimo rešitve, kjer vsaka od izhodnih vrednosti ustreza determinističnim

rešitvam izbranih vhodnih naključnih spremenljivk. Metoda na podlagi velikega števila iteracij izračunov statistično določi verjetnostni značaj izhodnih naključnih spremenljivk. Metoda Monte Carlo je sposobna obravnave zapletenih problemov, vendar je računsko izredno zahtevna in ni uporabna za probleme, ki zahtevajo rešitve sproti.

Zato v članku uporabljamo Hongovo točkovno ocenjevalno metodo, katere glavna prednost je poleg velike hitrosti izračuna uporaba istih determinističnih postopkov za izračun pretokov moči, kot jih uporablja metoda Monte Carlo.

Za uporabo Hongove točkovne ocenjevalne metode moramo posodobiti model za izračun pretokov moči. Injekcije vozlišč modeliramo skladno z njihovo verjetnostno porazdelitvijo, določeno glede na pretekla odstopanja napovedi. S tem omogočimo uporabo Hongove točkovne ocenjevalne metode za verjetnostni izračun pretokov moči in verjetnostno napoved izgub.

### 2.7.1 Hongova točkovna ocenjevalna metoda

Cilj vsake točkovne ocenjevalne metode je izračun momentov izhodnih naključnih spremenljivk, ki so funkcija  $n$  vhodnih naključnih spremenljivk. Prvo točkovno ocenjevalno metodo je razvil Rosenblueth [11] in je zahtevala  $2^n$  determinističnih izračunov problema za pridobitev momentov izhodnih naključnih spremenljivk. Točkovno ocenjevalno metodo je pozneje izboljšal Hong in je za pridobitev momentov izhodnih naključnih spremenljivk zahtevala  $Kn$  (oz.  $Kn+1$ ) determinističnih izračunov – torej se število izračunov povečuje linearno s številom vhodnih naključnih spremenljivk in ne eksponentialno [4]. Metoda je bila v literaturi uspešno uporabljena za različne izračune verjetnostnih pretokov moči [5]-[7]. Podroben opis različnih točkovnih metod je podan v [6].

Hongovo točkovno ocenjevalno metodo lahko opišemo z naslednjim postopkom.

Naj bo  $\mathbf{Z}=H(\mathbf{P})$  nelinearna funkcija več spremenljivk, npr. funkcija za izračun pretokov moči.  $\mathbf{Z}$  je vektor izhodnih naključnih spremenljivk,  $\mathbf{P}$  pa vektor  $n$  vhodnih naključnih spremenljivk ( $p_1, p_2, \dots, p_n$ ). Cilj je poiskati verjetnostno porazdelitev izhodnih naključnih spremenljivk z determinističnim reševanjem funkcije na različnih točkah, t. i. *koncentracijah*, ki jih pridobimo s pomočjo momentov  $n$  vhodnih naključnih spremenljivk.

Koncentracija ( $p_{i,k}, w_{i,k}$ ) vhodne naključne spremenljivke  $p_i$  je definirana kot par lokacije  $p_{i,k}$  in uteži  $w_{i,k}$ . Lokacija  $p_{i,k}$  je  $k$ -ta vrednost vhodne naključne spremenljivke, kjer deterministično izračunamo funkcijo  $H(\mathbf{P})$ . Utež  $w_{i,k}$  definira pomembnost determinističnega izračuna na tej lokaciji pri izračunu momentov izhodnih naključnih spremenljivk.

Tako se funkcija  $H(\mathbf{P})$  deterministično izračuna za vsako vhodno naključno spremenljivko  $p_i$  na  $K$  točkah, ki jih določa  $k$ -ta lokacija vhodne naključne

spremenljivke  $p_{ik}$  in srednje vrednosti preostalih  $n-1$  vhodnih naključnih spremenljivk, torej na  $K$  točkah ( $\mu_{p1}, \mu_{p2}, \dots, p_{i,k}, \dots, \mu_{pn}$ ), slika 5.

To zahteva  $Kn$  determinističnih izračunov, kjer je  $K$  odvisen od sheme točkovne ocenjevalne metode. Določene sheme zahtevajo dodaten izračun funkcije  $H(\mathbf{P})$  v točki, sestavljeni iz srednjih vrednosti vseh vhodnih naključnih spremenljivk ( $\mu_{p1}, \mu_{p2}, \dots, \mu_{pi}, \dots, \mu_{pn}$ ). V teh primerih je skupno število determinističnih izračunov enako  $Kn+1$ .

Koncentracije  $K$  za vhodne naključne spremenljivke so določene skladno s statističnimi informacijami vhodnih podatkov. Lokacije se določijo skladno z:

$$p_{i,k} = \mu_{p_i} + \xi_{i,k} \cdot \sigma_{p_i}, \quad (3)$$

kjer je  $\xi_{i,k}$  t. i. standardna lokacija in  $\mu_{pi}$  ter  $\sigma_{pi}$  sta srednja vrednost in standardna deviacija vhodne naključne spremenljivke  $p_i$ . Standardne lokacije in uteži so določene z rešitvijo nelinearnega sistema enačb:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^K w_{i,k} &= \frac{1}{n} \\ \sum_{k=1}^K w_{i,k} (\xi_{i,k})^j &= \lambda_{i,j}, \quad j=1, \dots, 2 \cdot K - 1 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

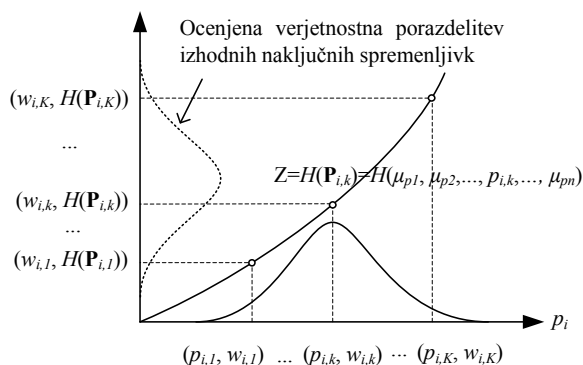
kjer je  $\lambda_{i,j}$   $j$ -ti moment vhodne naključne spremenljivke  $p_i$  definiran s svojo funkcijo verjetnostne porazdelitve  $f_{p_i}$ :

$$\lambda_{i,j} = \frac{M_j(p_i)}{(\sigma_{p_i})^j} \quad (5)$$

$$M_j(p_i) = \int_{-\infty}^{\infty} (p_i - \mu_{p_i})^j f_{p_i} \cdot dp_i.$$

Reševanje sistema enačb (4) je opisan v [12]. Ko so določene vse koncentracije ( $p_{i,k}, w_{i,k}$ ), se funkcija  $H(\mathbf{P})$  deterministično določi na točkah ( $\mu_{p1}, \mu_{p2}, \dots, p_{i,k}, \dots, \mu_{pn}$ ) za  $\mathbf{Z}_{i,k}$ . Z enačbo (6) določimo  $j$ -ti moment izhodne naključne spremenljivke:

$$E(\mathbf{Z}^j) \cong \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K w_{i,k} (\mathbf{Z}_{i,k})^j. \quad (6)$$



Slika 5: Hongova točkovna ocenjevalna metoda  
Figure 5. Hong's point estimate method.

V literaturi so bile predstavljene predvsem sheme  $Kn$  za  $K=2$  in  $K=3$  ter  $Kn+1$  sheme za  $K=2$  in  $K=4$  [6]. V

članku uporabljena shema  $2n+1$  je izbrana glede na predpostavko, da je verjetnostna porazdelitev vhodnih naključnih spremenljivk normalna z dodatnim upoštevanjem nesimetričnosti. Shemo  $2n+1$  določimo z reševanjem enačbe (4) za  $K=3$  z eno od standardnih lokacij  $\xi_{i,k}$  enako nič. Standardna lokacija in uteži so:

$$\begin{aligned}\xi_{i,k} &= \frac{\lambda_{i,3}}{2} + (-1)^{3-k} \sqrt{\lambda_{i,4} - \frac{3}{4}\lambda_{i,3}^2}, \quad k=1,2 \quad \xi_{i,3} = 0 \\ w_{i,k} &= \frac{(-1)^{3-k}}{\xi_{i,k}(\xi_{i,1} - \xi_{i,2})}, \quad k=1,2 \\ w_{i,3} &= \frac{1}{n} - \frac{1}{\lambda_{i,4} - \lambda_{i,3}^2}.\end{aligned}\quad (7)$$

Zaradi nastavitve  $\xi_{i,3} = 0$  v (3) je  $n$  od  $3n$  lokacij na enaki točki ( $\mu_{p1}, \mu_{p2}, \dots, p_{i,k}, \dots, \mu_{pn}$ ). Zato je pri tej shemi dovolj samo en dodaten izračun, kjer pa je treba za ta izračun ustrezno definirati utež  $w_0$ :

$$w_0 = \sum_{i=1}^n w_{i,3} = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{i,4} - \lambda_{i,3}^2}. \quad (8)$$

### 2.7.2 Postopek verjetnostnega izračuna pretokov moči in napovedi prenosnih izgub

Postopek izračuna momentov izhodne naključne spremenljivke, t. j. prenosnih izgub, lahko opišemo z naslednjimi koraki:

- 1) Določi število vhodnih naključnih spremenljivk, to so vozlišča EES, kjer smo napovedali injekcije moči. Pretekle natančnosti napovedi injekcij definirajo verjetnostne porazdelitve vhodnih naključnih spremenljivk. Standardna deviacija verjetnostne porazdelitve vhodne naključne spremenljivke  $p_i$  definira  $\sigma_{pi}$ , njena deterministična napoved pa definira  $\mu_{pi}$  v enačbi (3).
- 2) Določi  $E(\mathbf{Z})=0$ ,  $E(\mathbf{Z}^2)=0$ .
- 3) Nastavi  $i = 1$ .
- 4) Določi koncentracijo ( $p_{i,k}, w_{i,k}$ ) za  $k = 1,2$ .
- 5) Izvedi deterministični izračun pretokov moči za koncentraciji  $k = 1$  in  $2$  za vhodne naključne spremenljivke ( $\mu_{p1}, \mu_{p2}, \dots, p_{i,k}, \dots, \mu_{pn}$ ).
- 6) Ponovi korak 4 do 5 za  $i = i + 1$ , dokler se izračuni ne izvedejo za vse vhodne naključne spremenljivke.
- 7) Določi koncentracijo ( $p_{i,3}, w_0$ ) za  $k = 3$ .
- 8) Izvedi deterministični izračun pretokov moči za koncentracijo  $k = 3$  za vhodne naključne spremenljivke ( $\mu_{p1}, \mu_{p2}, \dots, \mu_{pi}, \dots, \mu_{pn}$ ).
- 9) Izračunaj  $E(\mathbf{Z})$ ,  $E(\mathbf{Z}^2)$ , oz. izračunaj srednjo vrednost in standardno deviacijo napovedanih izgub po enačbi (9), s katero določiš verjetnostno porazdelitev napovedanih prenosnih izgub.

$$\begin{aligned}\mu_z &= E(\mathbf{Z}) \\ \sigma_z &= \sqrt{E(\mathbf{Z}^2) - \mu_z^2}.\end{aligned}\quad (9)$$

## 3 Rezultati

Za preizkus predstavljene metode smo obravnavali napoved izgub za slovenski prenosni sistem, ki je vpet v interkonekcijo ENTSO-E (regija UCTE). Model za izračun pretokov moči je obsegal 400 kV, 220 kV in 110 kV napetostni nivo. Model je vključeval 186 vozlišč, 252 vodov, 60 transformatorjev in 8 mejnih vozlišč. Od teh je bilo 116 vozlišč z injekcijami moči (vključno z mejnimi vozlišči), ki so predstavljale vhodne naključne spremenljivke za verjetnostni izračun pretokov moči.

Napoved prenosnih izgub smo preizkusili za obdobje enega leta z naslednjimi znanimi podatki: urno porabo in proizvodnjo, urnimi prehodi moči, urnimi temperaturami in osvetljenostmi, padavinami in hitrostmi vetra.

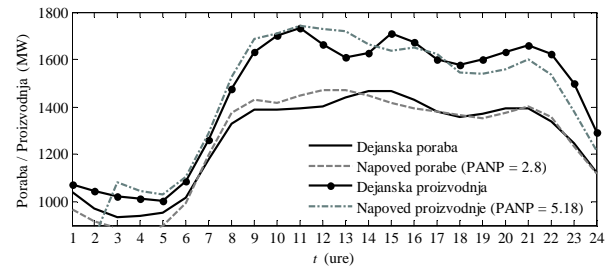
Tabela 1 prikazuje povprečne absolutne napake v odstotkih (PANP) in standardno deviacijo za kratkoročno napoved porabe, proizvodnje in prehodov moči za slovenski EES za obravnavano leto. Standardno deviacijo  $\sigma_{pi}$  v (3) smo definirali glede na srednjo vrednost preteklih PANP za vsako injekcijo posebej, srednjo vrednost  $\mu_{pi}$  pa določa sama deterministična napoved injekcije.

Tabela 1: PANP in standardna deviacija za kratkoročne napovedi po vozliščih za slovenski EES

Table 1. Mean absolute percentage error and st. deviation of the nodal short-term forecasts for the Slovenian power system.

	PANP	St. deviacija (%)
Poraba	3,64	3,77
Proizvodnja	4,96	7,52
Prehodi moči	15,37	11,21
Prenosne izgube	4,16	4,58

Slika 6 prikazuje primer kratkoročne napovedi porabe in proizvodnje za slovenski EES za naključno izbran dan. PANP za porabo in proizvodnjo je za prikazan dan enak 2,8 in 5,18.

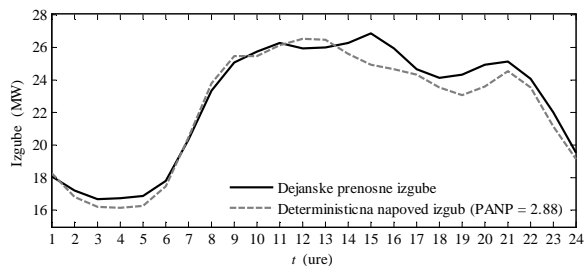


Slika 6: Primer kratkoročne napovedi porabe in proizvodnje za slovenski EES

Figure 6. Example of short-term load and generation forecasts for the Slovenian power system.

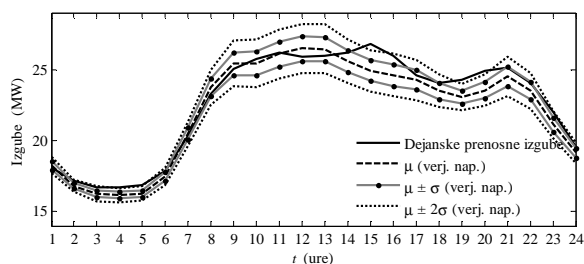
Slika 7 prikazuje deterministično napoved izgub za izbrani dan. Za deterministično napoved izgub smo

izvedli 24 izmeničnih izračunov pretokov moči. Skupni čas izračuna je znašal 0,333 sekunde. PANP za izbrani dan znaša 2,88 z največjim odstopanjem 7,6 % v uri 15.



Slika 7: Primer deterministične kratkoročne napovedi prenosnih izgub za slovenski EES  
Figure 7. Example of deterministic short-term loss forecasts for the Slovenian power system.

Primer verjetnostne napovedi prenosnih izgub je prikazan na sliki 8. Uporabljena  $2n+1$  shema je zahtevala 233 determinističnih izračunov pretokov moči s skupnim časom izračuna 80,176 sekund. Razmerje (v %), koliko dejanskih izgub je znotraj pasu odstopanja  $\pm e\sigma$  ( $e = 1, 2, 3$ ) je 54,17 %, 79,17 % in 100 %.



Slika 8: Primer verjetnostne kratkoročne napovedi prenosnih izgub za slovenski EES  
Figure 8. Example of probabilistic short-term loss forecasts for the Slovenian power system.

Rezultate verjetnostnih napovedi izgub z uporabo Hongove točkovne ocenjevalne metode smo primerjali z rezultati, pridobljenimi z uporabo metode Monte Carlo, kjer smo za vsako napovedano uro rešili 5000 determinističnih izračunov za različna verjetna stanja. Skupni čas izračuna metode Monte Carlo je tako znašal 1602,482 sekunde. Uporaba Hongove točkovne ocenjevalne metode v teh primerih pomeni približno dvajsetkratno pohitritev verjetnostnih napovedi izgub. Primerjava rezultatov uporabljenih verjetnostnih metod poda povprečno odstopanje 0,05 %, kar potrjuje natančnost in utemeljenost uporabo Hongove točkovne ocenjevalne metode.

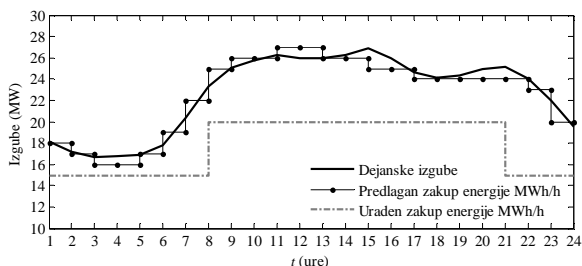
Tabela 2 predstavlja razmerje (v %), koliko dejanskih izgub je znotraj izračunanega pasu odstopanj  $\pm e\sigma$  ( $e = 1, 2, 3$ ), torej koliko dejanskih prenosnih izgub je znotraj intervala napovedi  $[\mu - e\sigma, \mu + e\sigma]$  oz  $[\mu, \mu \pm e\sigma]$ . S podanimi rezultati se lahko SO odloči o ustrezni strategiji nastopa na dnevnem trgu za nakup energije za kritje prenosnih izgub, s čimer se lahko zmanjšajo stroški SO.

Tabela 2: Razmerje (v %) koliko dejanskih izgub je znotraj napovedanega intervala odstopanj

Table 2. The ratio (in %) of the day-ahead forecasts for the analyzed year within the error bar.

Interval	Leto	Pon.	Tor. – Čet.	Pet.	Sob., Ned. + prazniki
$\mu \pm \sigma$	70,12	54,94	77,49	76,35	62,04
$\mu \pm 2\sigma$	93,78	92,27	95,66	96,87	89,87
$\mu \pm 3\sigma$	98,29	98,07	98,69	98,96	97,41
$[\mu, \mu + \sigma]$	36,31	34,33	43,09	35,61	26,71
$[\mu, \mu - \sigma]$	33,81	20,60	34,40	40,74	35,32
$[\mu, \mu + 2\sigma]$	52,01	69,53	58,62	45,87	36,59
$[\mu, \mu - 2\sigma]$	41,77	22,75	37,03	51,00	53,28
$[\mu, \mu + 3\sigma]$	54,99	75,32	61,22	47,67	39,53
$[\mu, \mu - 3\sigma]$	43,53	22,75	37,49	51,28	58,66

Slika 9 prikazuje primer nakupa energije za kritje prenosnih izgub za slovenski EES za izbrani dan (torek) z uporabo verjetnostnega načina napovedi. Statistična analiza, podana v tabeli 2, je pokazala, da je najbolj verjetna rešitev znotraj intervala  $[\mu, \mu + 2\sigma]$ , zato je ena od mogočih in verjetnih izbir za nakup energije enaka napovedi  $\mu + \sigma$ . Dodatno je treba upoštevati, da je najmanjša enota nakupa moči 1 MW in zato napoved zaokrožimo na takšno natančnost. Na sliki 9 predlagan nakup izgub dodatno primerjamo z uradnim načinom zakupa energije za kritje izgub, ki se izvaja na letni ravni – 15 MWh/h v pasu in 5 MWh/h v trapezu. Predlagana metoda prikazuje večjo izboljšavo pri nakupu energije.



Slika 9: Zakup energije za kritje izgub za dan napovedi z uporabo verjetnostnega načina napovedi prenosnih izgub za slovenski EES

Figure 9. Forecast results for the required energy purchase for the Slovenian transmission system using the probabilistic approach.

## 4 Ugotovitve

SO so z izvajanjem sistemskih storitev zadolženi za zakup energije za kritje prenosnih izgub. Pri tem je za ekonomično obratovanje na dnevni ravni bistvena hitra in natančna kratkoročna napoved prenosnih izgub.

Zato v članku predstavljamo metodo za verjetnostno napoved prenosnih izgub, ki upošteva glavne vplivne dejavnike na izgube in negotovost obratovanja EES prek verjetnostnih izračunov pretokov moči. Za verjetnostni izračun pretokov moči smo v članku uporabili Hongovo  $2n+1$  točkovno ocenjevalno metodo, ki je hitra in učinkovita metoda za kratkoročno

verjetnostno napoved prenosnih izgub. Z uporabo predstavljene metode tako poleg napovedi prenosnih izgub podamo še dodatno informacijo o negotovosti napovedi izgub, s čimer se lahko SO lažje odloči o nastopu na dnevnem trgu za zakup energije za kritje izgub.

Rezultati verjetnostnih napovedi izgub in načina zakupa energije so na primeru opazovanega obdobja enega leta podali močno izboljšavo v primerjavi s trenutnim načinom zakupa energije.

## 5 Literatura

- [1] Sandrin, P., "System-services: several questions, in an integrated utility perspective [ancillary services]," Pricing of Ancillary Services: an International Perspective (Digest No: 1996/164), IEE Colloquium on, vol., no., pp.7/1-7/5, 28 Jun 1996
- [2] Swissgrid, Publication of the AS Concept on the Internet, Swissgrid, 2008. Available: [http://www.swissgrid.ch/power\\_market/grid\\_operation/ancillary\\_services/as\\_documents/](http://www.swissgrid.ch/power_market/grid_operation/ancillary_services/as_documents/)
- [3] ELES, Rules for the purchase of energy to cover losses on the transmission system in the year 2010. Available: <http://www.eles.si/en/purchase-of-energy-to-cover-losses-on-the-transmission-system-in-the-year-2010.aspx>
- [4] Hong H. P., "An efficient point estimate method for probabilistic analysis," Reliability Engineering and System Safety, vol. 59, 1998, pp. 261-267
- [5] Caramia P., Carpinelli G., Point estimate schemes for probabilistic three-phase load flow, Electric Power Systems Research, Volume 80, Issue 2, February 2010, Pages 168-175
- [6] Morales, J.M.; Perez-Ruiz, J.; , "Point Estimate Schemes to Solve the Probabilistic Power Flow," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.22, no.4, pp.1594-1601, Nov. 2007
- [7] Verbic, G.; Canizares, C.A.; , "Probabilistic Optimal Power Flow in Electricity Markets Based on a Two-Point Estimate Method," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.21, no.4, pp.1883-1893, Nov. 2006
- [8] Jain, A.; Satish, B., "Clustering based Short Term Load Forecasting using Support Vector Machines," PowerTech, 2009 IEEE Bucharest , vol., no., pp.1-8, June 28 2009-July 2 2009
- [9] Moghaddas-Tafreshi, S.M.; Farhadi, M.; , "A linear regression-based study for temperature sensitivity analysis of Iran electrical load," Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on , vol., no., pp.1-7, 21-24 April 2008
- [10] Chow J. H.; Wu F. F.; Momoh J. A., Applied Mathematics for Restructured Electric Power Systems. New York: Springer US, 2006, ch. 12
- [11] E. Rosenblueth, Point estimation for probability moments. In: *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* **72** (1975), pp. 3812–3814.
- [12] Miller A. C., Rice T. R., "Discrete approximations of probability distributions," *Manage. Sci.*, vol. 29, no. 3, pp. 352-362, Mar. 1983.
- [13] ELES, Rules for the purchase of energy to cover losses on the transmission system in the year 2010. Available:

<http://www.eles.si/en/purchase-of-energy-to-cover-losses-on-the-transmission-system-in-the-year-2010.aspx>

**Matej Rejc** je diplomiral leta 2007 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je zaposlen kot asistent v Laboratoriju za elektroenergetske sisteme na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani.

**Miloš Pantoš** je diplomiral leta 2001 in doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Od leta 2006 je zaposlen kot docent in vodja Laboratorija za elektroenergetske sisteme na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani.