

Vrednost nedobavljene električne energije v Sloveniji

Jerneja Bogovič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: jerneja.bogovic@fe.uni-lj.si

Povzetek. V prispevku je uporabljena regresijska analiza za napoved vrednosti nedobavljene električne energije, podane s kazalnikom vrednosti izpadlega odjema (*VOLL*) v Sloveniji za leta 2020, 2021 in 2022. Kot vplivni parameter za napovedovanje smo uporabili makroekonomski kazalnik bruto domačega proizvoda (*BDP*). Napoved vrednosti kazalnika *VOLL* smo uporabili, da bi lahko čim prej določili vrednost nedobavljene električne energije, kajti standardne metode, ki se uporabljajo, so ali dolgotrajne ali pa temeljijo le na makroekonomskih parametrih. Rezultati metode podajajo dobro oceno vrednosti kazalnika *VOLL*, ki temelji na pripravljenosti odjemalcev na plačilo ali kompenzacijo, saj je ocenjena vrednost za leto 2022 11,0 €/kWh, vrednost, ki se uporablja kot posledica uredbe Evropske unije o notranjem trgu električne energije za določitev standardov zanesljivosti oskrbe z električne energijo pa znaša 10,6 €/kWh.

Ključne besede: korelacijska analiza, regresijska analiza, vrednost nedobavljene električne energije

Value of lost load in Slovenia

The paper presents a regression method to predict the Value of the Lost Load (*VOLL*) in Slovenia in 2020, 2021 and 2022 by using a macroeconomic indicator of the gross domestic product as the impacting parameter. As the currently applied methods are either of a long-term character or are based only on macroeconomic parameters, the *VOLL* forecast will speed-up the *VOLL* estimation. Using the method gives a good *VOLL* estimation provided the customers will accept to pay 11.0 €/kWh provided in 2022. The current cost foreseen by the European Union for the Internal electricity Market to assure a reliable power supply is 10.6 €/kWh.

Keywords: correlation, regression, value of lost load

1 UVOD

V sodobni družbi smo vse bolj odvisni od uporabe električne energije, zato je kontinuiranost dobave električne energije bistvenega pomena za delovanje družbe. Vendar v določenih, čeprav zelo redkih, primerih pride do prekinitve dobave električne energije.

Vsaka prekinitve dobave električne energije pa odjemalcu prinaša stroške. Na njihovo velikost vplivata različna narava in raznolikost posledic, ki jih prinašajo prekinitve dobave. Za gospodinjstve odjemalce se stroški lahko odražajo v obliki izpadlega dohodka ali poslabšanja kakovosti bivanja, kot stroški zaradi popravila in obrabe aparatov in nadomeščanja nedobavljene električne energije, v primeru daljših izpadov pa tudi kot uničenje živil. V industriji pa stroški nedobavljene električne energije nastanejo zaradi dodatne porabe materiala, popravila osnovnih sredstev, ponovnega zagona obrata, nadomeščanja nedobavljene

električne energije in ne nazadnje tudi zaradi zamud in izpada prodaje. Posebna skupina stroškov so stroški zaradi državljanske nepokorščine in plenjenja med daljšim izpadom ter okvare na varnostnih napravah v industrijskih tovarnah, kar lahko privede do obvezne evakuacije iz vseh objektov v okolici [1].

V literaturi [2] je zaslediti več metod za izračun vrednosti nedobavljene električne energije, ki je definirana kot denarna vrednost stroškov, normirana na nedobavljeno električno energijo. Metode lahko v splošnem razdelimo na tri skupine:

- **Anketiranje odjemalcev** je najpogostejša metoda za vrednotenje nedobavljene električne energije. Anketiranec na podlagi vprašalnika oceni škodo ali denarno izgubo, ki jo je utrpel ob izpadu napajanja. Slabost metode je, da odjemalec ali preceni ali podceni stroške, povezane z izpadom električne energije. Poleg ankete o škodi se lahko uporablja tudi anketa, ki anketirance sprašuje o pripravljenosti odjemalca na plačilo, da ne bo utrpel prekinitve dobave, oz. na kompenzacijo, če pride do prekinitve dobave električne energije.
- **Študije specifičnih izpadov** se najpogosteje uporabijo, kadar pride do dejanskega izpada električne energije. Ta metoda da najboljšo oceno škode, vendar ni uporabna v primerih, ko v preteklosti ni prišlo do izpada napajanja.
- **Posredne analitične ocene** definirajo vrednost nedobavljene električne energije na podlagi različnih makroekonomskih kazalnikov. Prednost te metode je, da se ocene enostavno izračunajo. Njena slabost pa je, da temeljijo na omejujočih in nerealističnih predpostavkah.

Poleg različnih metod se za vrednotenje nedobavljene električne energije uporabljajo tudi različni kazalniki [3], ki so:

- cena nedobavljene energije (angl. Cost of Energy Not Supplied – *CENS*) predstavlja povprečne stroške med trajanjem prekinitve;
- vrednosti izpadlega odjema (angl. Value of Lost Load – *VOLL*) predstavlja normirane stroške na nedobavljeno električno energijo;
- stopnja izpadle energije (angl. Interrupted Energy Assessment Rate – *IEAR*) prav tako predstavlja normirane stroške na nedobavljeno električno energijo.

Čeprav so za vrednotenje nedobavljene električne energije razviti različni kazalniki, se najpogosteje uporablja kazalnik *VOLL*. Razlog je tudi Uredba (EU) 2019/943 Evropskega parlamenta in Sveta o notranjem trgu električne energije [4], ki določa, da morajo države Evropske unije (EU) pripraviti standarde zanesljivosti, ki temeljijo na metodologiji Methodology for calculating the value of lost load, the cost of new entry and the reliability standard (metodologija ACER) [5]. V metodologiji je določen postopek izračuna kazalnika *VOLL*, ki temelji na metodi anketiranja, pri čemer se ne orientira na stroške prekinitve dobave, ampak na pripravljenost odjemalcev na plačilo ali kompenzacijo.

Ker je večina anket, narejenih za Slovenijo, ki so se v preteklosti uporabljale za določitev kazalnika *VOLL*, temeljila na oceni stroškov, smo na tem mestu z uporabo korelacije na podlagi podatkov o *VOLL* iz študije Study on the value of lost load of electricity supply in Europe – ACER [6] in študije Vrednotenje nedobavljene električne energije ob prekinitvah dobave [1] podali oceno kazalnika *VOLL*, ki temelji na pripravljenosti odjemalcev na plačilo ali kompenzacijo. Ker se vrednosti kazalnika *VOLL* z leti spreminjajo, pa smo z uporabo regresije v odvisnosti od bruto domačega proizvoda (*BDP*) [7] podali oceno kazalnika *VOLL* za leta 2020, 2021 in 2022.

2 METODOLOGIJA ZA IZRAČUN KAZALNIKA *VOLL*

Za izračun kazalnika *VOLL* smo uporabljali dva dela izračuna in posledično metodologij. Prvi del izračuna je bil namenjen korelacijski analizi med podatki kazalnika *VOLL_o*, ki so bili pridobljeni z anketiranjem o ocenah škode, in kazalnika *VOLL_{WT}*, ki temelji na pripravljenosti odjemalcev na plačilo ali kompenzacijo, ter določitvi enačbe odnosa za podatke za preslikavo korelacijskih spremenljivk.

Korelacijska analiza [8] proučuje soodvisnost (povezanost, usklajenost) med dvema (ali več) statističnima spremenljivkama [9]. Moč povezanosti med spremenljivkama je lahko naključna, šibka oziroma nizka, srednje močna, močna oziroma visoka ali popolna. Če je moč povezanosti visoka ali popolna, lahko določimo koeficient povezanosti, ki ima lahko

pozitivno vrednost (kadar je med spremenljivkama sorazmerni odnos) ali negativno (kadar je med spremenljivkama obratno sorazmerni odnos). Povezanost lahko v takih primerih zapišemo tudi z enačbo odnosa, ki je za naš primer opisana z enačbo (1) in jo lahko uporabimo tudi za nadaljnje preslikave korelacijskih spremenljivk *VOLL_o* v *VOLL_{WT}* in obratno.

$$VOLL_{WT} = k \cdot VOLL_o \quad (1)$$

Pri čemer je:

- *VOLL_{WT}* ... vrednost izpadlega bremena, ki temelji na pripravljenosti odjemalcev na plačilo ali kompenzacijo;
- *k* ... koeficient premege sorazmerja;
- *VOLL_o* ... vrednost izpadlega bremena, ki temelji na oceni škode.

Drugi del izračuna pa predstavlja napoved vrednosti kazalnika *VOLL* z uporabo regresijske analize [10]. Regresijska analiza je kvantitativna statistična metoda, ki analizira povezavo med odvisno spremenljivko in eno ali več neodvisnimi spremenljivkam ali dejavniki. Matematična oblika povezanosti je lahko linearna, potenčna, eksponentna, recipročna, logaritemska, korenska itd. V praksi se največkrat uporablja linearna povezanost, tudi tako, da se nelinearna regresijska zveza poskuša s pomočjo transformacije spremenljivk pretvoriti v linearno zvezo.

Nadalje se za izdelavo regresijske analize postavijo teoretične predpostavke o odvisnosti med spremenljivkami. Kot statistično značilen se je v študiji Cambridge Economic Policy Associates (CEPA) [6] pojavil trend, da imajo države EU z višjim življenjskim standardom tudi višje vrednosti *VOLL*. Eden izmed mikroekonomskih parametrov, ki opisuje standard, je tudi *BDP*.

Sledi izračun oz. ocena parametrov regresijskega modela, pri čemer se parametre modela določi z metodo najmanjših kvadratov (MNK). MNK je standardni pristop za določitev funkcije odvisnosti predimenzioniranega sistema, pri čemer se minimizira vsota kvadratov odstopanj, kar v splošnem opisuje enačba (2) in za naše podatke enačba (3).

$$\min S = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \beta))^2 \quad (2)$$

Pri čemer je:

- *S* ... vsota kvadratov;
- *n* ... število podatkov;
- *y_i* ... vrednost odvisne spremenljivke;
- *x_i* ... vrednost neodvisne spremenljivke;
- *β* ... vrednost koeficientov funkcije *f*.

$$\min S = \sum_{i=1}^n (VOLL_{oi} - f(BDP_i, \beta))^2$$

$$\min S = \sum_{i=1}^n (VOLL_{WTi} - f(BDP_i, \beta))^2 \quad (3)$$

Pri čemer je:

- S ... vsota kvadratov;
- n ... število podatkov;
- $VOLL_{WTi}$... vrednost izpadlega bremena, ki temelji na pripravljenosti odjemalcev na plačilo ali kompenzacijo v i -tem letu;
- $VOLL_{oi}$... vrednost izpadlega bremena, ki temelji na oceni škode v i -tem letu;
- BDP_i ... bruto domači proizvod v i -tem letu;
- β ... vrednost koeficientov funkcije f .

Zadnji korak je izračun oz. napoved vrednosti kazalnika $VOLL$ (enačba (4)).

$$VOLL_o = f(BDP, \beta)$$

$$VOLL_{WT} = f(BDP, \beta) \quad (4)$$

Pri čemer je:

- β ... vrednost koeficientov funkcije f ;
- $VOLL_{WTi}$... vrednost izpadlega bremena, ki temelji na pripravljenosti odjemalcev na plačilo ali kompenzacijo v i -tem letu;
- $VOLL_{oi}$... vrednost izpadlega bremena, ki temelji na oceni škode v i -tem letu;
- BDP_i ... bruto domači proizvod.

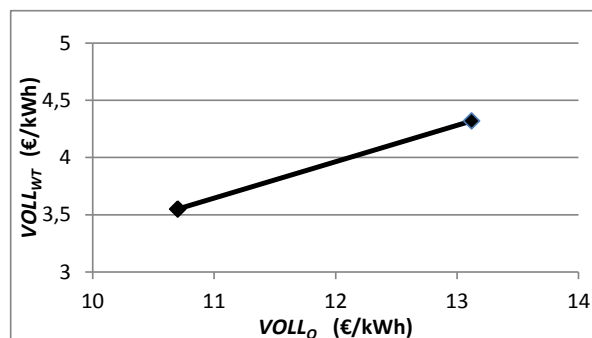
3 IZRAČUN KAZALNIKA VOLL

3.1 Primerjava kazalnika VOLL

V letu 2016 sta za območje Slovenije hkrati potekali dve študiji, ki sta ocenjevali vrednost kazalnika $VOLL$. V prvi študiji, ki jo je izvajalo podjetje Cambridge Economic Policy Associates (CEPA) [6], je ocena temeljila na metodi anketiranja, kjer so anketirance spraševali po pripravljenosti na plačilo ali kompenzacijo. V drugi študiji, ki jo je izvajala Fakulteta za elektrotehniko (FE) [1], pa je ocena kazalnika $VOLL$ temeljila na anketiranju odjemalcev o oceni stroškov ob prekinitvah dobave.

Ker sta se obe študiji izvajali istočasno, bi pričakovali, da bosta dali podobne ali celo enake rezultate. Vendar ni bilo tako. V študiji CEPA je bila vrednost kazalnika $VOLL$ za Slovenijo za leto 2016 3,55 €/kWh, v študiji FE pa 10,70 €/kWh. Tudi pri podskupinah odjemalcev je bilo zaslediti podoben trend. Vrednost kazalnika $VOLL$ je bila za gospodinjstva v študiji CEPA 4,32 €/kWh, študija FE pa je podala vrednost 13,12 €/kWh. Izvedli smo korelacijsko analizo ter določili koeficient korelacije, ki je znašal 1, kar

pomeni, da sta spremenljivki med sabo močno povezani, in to lahko vidimo tudi na sliki 1.



Slika 1: Korelacija med $VOLL_o$ in $VOLL_{WT}$.

Po drugi strani pa vrednost koeficienta korelacije 1 pomeni, da gre pri korelaciji za premo sorazmerje. Za oba podatka smo izračunali vrednost koeficienta premege sorazmerja iz enačbe (1), ki je v obeh primerih znašal 0,33 (enačba (5)).

$$k = \frac{VOLL_{WT}}{VOLL_o} = \frac{3,55}{10,70} = 0,33$$

$$k = \frac{VOLL_{WT}}{VOLL_o} = \frac{4,32}{13,12} = 0,33 \quad (5)$$

Na podlagi določenega faktorja pretvorbe smo preračunali vrednosti kazalnika $VOLL_o$ iz preteklih anket [1] v vrednosti kazalnika $VOLL_{WT}$. Vrednosti so podane v tabeli 1.

Tabela 1: Podatki o $VOLL_o$ iz preteklih anket in preračunane vrednosti $VOLL_{WT}$.

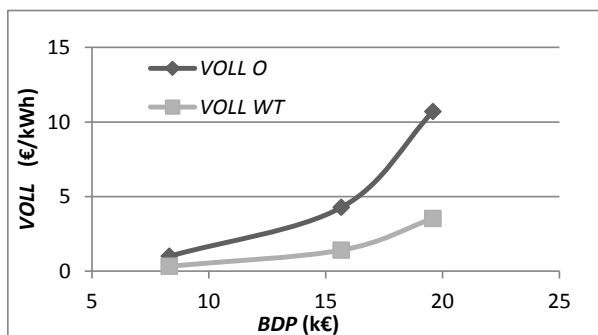
Leto	1995	2006	2016
$VOLL_o$ (€/kWh)	1,00	4,28	10,70
$VOLL_{WT}$ (€/kWh)	0,33	1,41	3,52

3.2 Napoved kazalnika VOLL

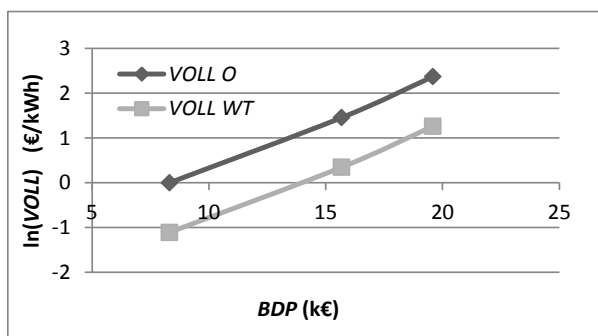
Za napoved vrednosti kazalnika $VOLL$ z regresijsko metodo smo najprej izbrali vplivni dejavnik. Ker je v literaturi [6] omenjeno, da je zaznati statistično povezavo med življenjskim standardom in $VOLL$, smo kot vplivni dejavnik izbrali makroekonomski kazalnik BDP . Izrisali smo odvisnost kazalnika $VOLL$ od BDP za leta 1995, 2006 in 2016. Prikazana je tudi na sliki 2, kjer je s temno sivo označen kazalnik $VOLL_o$ in s svetlo sivo kazalnik $VOLL_{WT}$.

Naslednji korak je bil izbira regresijskega modela. Ker na sliki 2 vidimo, da največkrat uporabljena linearna povezanost ni najboljše mogoče varianta povezanosti za ta primer, smo izvedli transformacijo spremenljivke $VOLL$. Vrednost kazalnika $VOLL$ smo logaritmizirali, posledica pa je bila linearna povezanost med spremenljivkama (slika 3).

Sledil je izračun oz. ocena parametrov regresijske (linearne) funkcije z uporabo MNK. Linearne funkcije, ki povezuje parameter BDP in kazalnik $VOLL_O$, je podana z enačbo (6), enačba (7) pa opisuje razmerje med BDP in kazalnikom $VOLL_{WT}$.



Slika 2: Kazalnik $VOLL_O$ in $VOLL_{WT}$ v odvisnosti od BDP .



Slika 3: Kazalnik $VOLL_O$ in $VOLL_{WT}$ v odvisnosti od BDP po logaritmski transformaciji.

$$\ln(VOLL_O) = \beta_1 \cdot BDP + \beta_2 \quad (6)$$

$$\ln(VOLL_O) = 0,2085 \cdot BDP - 1,7541$$

$$\ln(VOLL_{WT}) = \beta_1 \cdot BDP + \beta_2 \quad (7)$$

$$\ln(VOLL_{WT}) = 0,2085 \cdot BDP - 2,8649$$

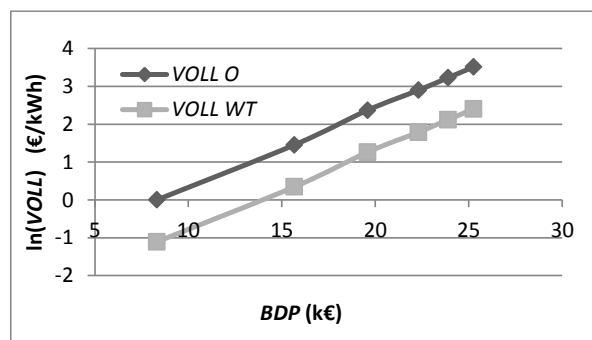
Na podlagi podatkov in napovedi BDP [7] za leta 2020, 2021 in 2022 smo izračunali kazalnika $VOLL_O$ in $VOLL_{WT}$ za vsa tri leta. Vrednosti so podane v tabeli 2.

Tabela 2: Napoved vrednosti kazalnika $VOLL$.

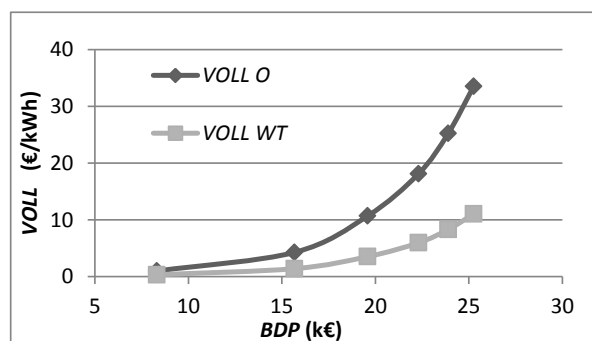
Leto	2020	2021	2022
BDP (k€)	22,312	23,897	25,259
$VOLL_O$ (€/kWh)	18,1	25,3	33,5
$VOLL_{WT}$ (€/kWh)	6,0	8,3	11,0

Opazimo lahko, da je napoved vrednosti kazalnika $VOLL_{WT}$ za leto 2022 le nekoliko višja od vrednosti kazalnika $VOLL_O$ iz leta 2016, na drugi strani pa je vrednost kazalnika $VOLL_O$ za leto 2022 zaradi eksponentne oblike odvisnosti za trikratnik večja v primerjavi z letom 2016. Za predstavbo so vrednosti

kazalnika $VOLL$ izrisane na slikah 4 in 5. Slika 4 prikazuje odvisnost logaritmirane vrednosti kazalnika $VOLL$ od BDP in slika 5 odvisnost kazalnika $VOLL$ od BDP .



Slika 4: Logaritmirana napoved vrednosti kazalnika $VOLL_O$ in $VOLL_{WT}$ v odvisnosti od BDP .



Slika 5: Napoved vrednosti kazalnikov $VOLL_O$ in $VOLL_{WT}$ v odvisnosti od BDP .

4 ZAKLJUČEK

V prispevku smo napovedali vrednost kazalnika $VOLL$ z uporabo korelacijske in regresijske analize. Korelacijsko analizo smo uporabili z namenom pretvorbe kazalnika $VOLL_O$ v $VOLL_{WT}$. Z regresijsko analizo pa smo najprej izdelali regresijski model, na podlagi katerega smo napovedali vrednost kazalnikov $VOLL_O$ in $VOLL_{WT}$ za leta 2020, 2021 in 2022. Čeprav je ocenjena vrednost kazalnika $VOLL_O$ zelo visoka, je vrednost kazalnika $VOLL_{WT}$ primerljiva z vrednostjo, ki se uporablja za določitev standarda zanesljivosti za Slovenijo v letu 2022. Ocenjena vrednost po predstavljeni metodologiji za leto 2022 znaša 11,0 €/kWh. Vrednost kazalnika $VOLL$, ki se uporablja za določitev standardov zanesljivosti v letu 2022, pa je 10,6 €/kWh [1].

Področje napovedovanja je zelo občutljiva tema, še zlasti ko imamo malo podatkov. Tudi v našem primeru se soočamo z malo podatki, zaradi česar nismo mogli izvesti podrobnejše analize in primerjav končnih rezultatov. Če bi želeli metodo preizkusiti za napoved kazalnika $VOLL$ za druge države, pa bi morali opraviti celotno proceduro izračuna, saj so model in parametri modela določeni na podlagi podatkov za Slovenijo.

LITERATURA

- [1] J. Bogovič, S. Davidov, in M. Pantoš, *Vrednotenje nedobavljene električne energije ob prekinitvah dobave: študija št. 09/2017*. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za elektroenergetske sisteme, 2018.
- [2] A. Shivakumar *idr.*, „Valuing blackouts and lost leisure: Estimating electricity interruption costs for households across the European Union“, *Energy Res. Soc. Sci.*, let. 34, št. Supplement C, str. 39–48, dec. 2017, doi: 10.1016/j.erss.2017.05.010.
- [3] Z. Bozic, „Customer interruption cost calculation for reliability economics: practical considerations“, v *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409)*, 2000, let. 2, str. 1095–1100 let. 2. doi: 10.1109/ICPST.2000.897173.
- [4] *Uredba (EU) 2019/943 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 5. junija 2019 o notranjem trgu električne energije (Besedilo velja za EGP.)*, let. 158. 2019. Pridobljeno: sep. 09, 2021. [Na spletu]. Dostopno na: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/943/oj/slv>
- [5] „ACER Decision 23-2020 on VOLL CONE RS - Annex I.pdf“. Pridobljeno: sep. 09, 2021. [Na spletu]. Dostopno na: https://extranet.acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Individual%20decisions%20Annexes/ACER%20Decision%20No%2023-2020_Annexes/ACER%20Decision%2023-2020%20on%20VOLL%20CONE%20RS%20-%20Annex%20I.pdf
- [6] „CEPAPresentation_VoLLWorkshop.pdf“. Pridobljeno: sep. 30, 2021. [Na spletu]. Dostopno na: https://extranet.acer.europa.eu/Events/Workshop-on-the-estimation-of-the-cost-of-disruption-of-gas-supply-CoDG-and-the-value-of-lost-load-in-power-supply-systems-VoLL-in-Europe/Documents/CEPAPresentation_VoLLWorkshop.pdf
- [7] „Urad RS za makroekonomske analize in razvoj“. <https://www.umar.gov.si/> (pridobljeno sep. 30, 2021).
- [8] „Linearna povezanost dveh spremenljivk“, *BenSTAT*. <https://www.benstat.si/blog/linearna-povezanost-dveh-spremenljivk/> (pridobljeno sep. 30, 2021).
- [9] „Pearsonov koeficient korelacije“, *BenSTAT*. <https://www.benstat.si/blog/pearsonov-koeficient-korelacije/> (pridobljeno sep. 30, 2021).
- [10] „Regresijska analiza“, *BenSTAT*. <https://www.benstat.si/blog/regresijska-analiza/> (pridobljeno sep. 30, 2021).

Jerneja Bogovič je leta 2011 diplomirala, leta 2017 pa doktorirala na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlena je kot asistentka na isti fakulteti. Področje njenega raziskovalnega dela vključuje predvsem analizo elektroenergetskih omrežij in sistemov ter kazalnikov zanesljivosti.