

IZRAČUN EMISIJ HRUPA VISOKONAPETOSTNEGA DALJNOVODA

Klemen DEŽELAK, Jožef KADIŠ, Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

V članku smo obravnavali problematiko izračuna emisij hrupa visokonapetostnih daljnovodov, ki jih povzroča korona. V začetnem delu smo predstavili teoretično osnovo pojava korone in njene posledice. Predstavili smo nekatere bolj pogoste metode za izračun emisij hrupa visokonapetostnih daljnovodov. Za emisije hrupa in nastanek pojava korone so bistvene vrednosti električne poljske jakosti ob vodniku, zato smo podali primerjavo treh metod za izračun električnega polja. Metode izračuna emisij hrupa smo uporabili pri izračunih emisij za različne izvedbe daljnovodov.

ABSTRACT

The paper deals with the calculation of audible noise emissions caused by high voltage overhead power lines due to corona. The first part describes the theoretical basis of corona occurrence and its consequences. Furthermore, the paper presents frequently used methods for the calculation of audible noise emissions caused by high voltage overhead power lines. Electric field strength values around conductor are essential for audible noise emissions and the occurrence of corona, therefore, the comparison of three methods for the calculation of electric field was performed. All of the methods were used for calculating the audible noise emissions caused by various overhead power lines.

1. UVOD

Z začetkom izgradnje visokonapetostnih daljnovodov v začetku prejšnjega stoletja se je pojavil problem korone, ki pred tem ni bil aktualen. Sprva so bile v ospredju predvsem koronske izgube, ki so z višanjem obratovalnih napetosti vse večje in pogosto presegajo velikost joulskih izgub. Seveda pa te niso edina posledica, ki jih povzroča korona. Poznamo še interferenčne, oziroma radijske motnje in zvočni hrup ter modrikasto svetlobo, vibracije vodnikov in ozon, ki pa nimajo večjega vpliva na sam sistem.

Proces pridobivanja koridorjev za izgradnjo novih visokonapetostnih daljnovodov je v tem času zelo težaven in dolgotrajen proces, predvsem s strani okoljevarstvenih in pravnolastniških zahtev. Eden vplivnih dejavnikov, ki se upošteva v sklopu zakonodaje varstva narave, je hrup, ki ga povzroči visokonapetostni daljnovod. V Sloveniji so mejne vrednosti hrupa, predpisane v Uredbi o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju, ki je

začela veljati leta 2005 [1]. V tujini se s problematiko hrupa in njegovega izračuna ukvarjajo dalj časa. Razlog je praktična uporaba višjih napetostnih nivojev, 500 kV, 750 kV in več, kjer je pojav korone kot generatorja vira hrupa vse izrazitejši.

V Sloveniji smo pred izzivom graditve novih visokonapetostnih 400 kV daljnovodov, kakor tudi posodobitvijo obstoječih visokonapetostnih daljnovodov. Zato je projektiranje daljnovodov postavljeno pred nov izziv, kako narediti daljnovod, ki bo zadovoljeval tehnične zahteve po zanesljivem in varnem obratovanju ter okoljevarstvene zahteve ob spremenljivem investicijskem strošku.

Cilj dela je torej prikazati način in rezultate izračuna emisij hrupa, ki ga povzroča korona. V posameznih državah za izračune uporabljajo različne enačbe, dobljene na podlagi podatkov dolgotrajnih meritev na daljnovodih. Zaradi tega obstaja veliko med seboj zelo podobnih računskih metod za določitev jakosti hrupa, ki ga povzroča daljnovod. Omenjene metode so prilagojene posameznim obstoječim daljnovodom, zato je izbira metode za izračun hrupa, ki ga povzroča poljubno izbran daljnovod, zelo zahtevna in ni enoumna. V tem članku smo primerjali tri različne metode za izračun hrupa, ki ga povzroča daljnovod.

2. TEORIJA NASTANKA HRUPA

Glavni izolator nadzemnega voda je zrak, ki ni idealni izolator in v določenih pogojih (če se ionizira) zelo dobro vodi električni tok. Pri nadzemnih vodih se to dogaja pri pojavu imenovanim korona. Zrak je sestavljen iz raznih vrst plinov, zato je vedno delno ioniziran. Molekule nekaterih vrst plinov lahko izgubijo enega ali več elektronov, kar povzroči prevlado pozitivnega naboja. Vzroki za nastanek ionizacije so razni zunanji vplivi (x – žarki, kozmični žarki, močno segrevanje), ki povzročijo, da se v odsotnosti električnega polja pričnejo ioni plina gibati neusmerjeno in kaotično. Če se ti ioni in prosti elektroni znajdejo v električnem polju, takrat na njih delujejo sile, ki so proporcionalne produktu električne poljske jakosti (električnega gradienta) in naboja iona ali elektrona. Ta sila pospeši ione (elektrone) po zraku, ki je sestavljen iz več plinov, predvsem pa z nenabitimi molekulami, ki se ne gibljejo. Ti pospešeni ioni zaradi neusmerjenega gibanja povzročijo trke z mirujočimi nabitimi molekulami. Ob trku sprosti nevtralni atom en elektron in tako nastaneta pozitivni ion in prosti elektron. Trki elektronov in atomov so elastični, kot trk dveh biljardnih krogel, zato elektron ob trku z atomom izgubi le majhen delček svoje kinetične energije. S tem se sproži verižna reakcija, katere posledica so nastanek negativnih elektronov in pozitivno nabitih ionov [2]. V močnem električnem polju lahko torej naelektreni delci (v glavnem elektroni) med dvema zaporednima trkoma dobijo tolikšen prirastek kinetične energije, da izzovejo ionizacijo molekul. To pomeni prehajanje molekul v prevzbujeno stanje, ki se kaže v prehodu nekaterih elektronov z nižjih energetskega nivojev na višje.

Proces trka elektronov z nabitimi molekulami lahko prikažemo s sledečim izrazom:



A – atom, A^+ - pozitivni ion, e – elektron

Za samo ionizacijo molekul je potrebna dovolj velika kinetična energija udarnega elektrona, ki mora biti večja od energije ionizacije molekul ($W > W_i$). Kadar pa energija pospešenega elektrona ni dovolj velika, da bi izvršila ionizacijo molekule, ta preide v prevzbujeno stanje, ki se kaže v prehodu nekaterih elektronov iz nižjih energetskega nivojev na višje. Z vračanjem teh elektronov v prvobitno stanje pride do emisije fotonov, oziroma do sevanja presežne energije v obliki svetlobe (vidne korone) in elektromagnetnega valovanja.

Pojav korone je opazen predvsem v bližini visokonapetostnih daljnovodov, v času, ko je v zraku precej vlage, sploh pa v času slabega vremena oziroma padavin. Sam pojav je intenzivnejši na delih vodnikov, kjer so nečistoče, bodisi kakšna izpostavljena mesta ali ostri deli. Pri šibkem električnem polju se korona najprej pojavi samo na določenih mestih, kar imenujemo lokalna korona. Z višanjem električne poljske jakosti pa nastane splošna korona na celim vodniku. Če bi napetost še zviševali, bi prišlo tudi do preskoka med fazami. Kritična električna poljska jakost (gradient), ki je potrebna, da izzove kumulativno ionizacijo zraka pri temperaturi 25°C in tlaku 1013 mbar, kar so standardni pogoji, znaša 30 kV/cm, oziroma 21,2 kV/cm efektivne vrednosti, kar predstavlja električno trdnost zraka. To velja, če je električna poljska jakost skalarna spremenljivka in sinusne oblike. Vendar gradient takšne vrednosti na površini vodnika ne bi bil dovolj velik, saj se gradient v oddaljenosti od vodnika zmanjša, tako da je srednji gradient dosti manjši od tistega na površini žice in v tem primeru ne bi prišlo do pojava korone. Vemo, da je srednja svobodna pot delca zelo kratka v primerjavi s polmerom vsakega daljnovodnega vodnika [3].

Ko je kritična poljska jakost presežena, se lahko število ionov ob površini žice mnogokrat poveča in s tem da možnost ionom, da se lahko akumulirajo v dovolj velikih količinah in tako lahko nastane korona.

3. OPIS METOD IZRAČUNA EMISIJ HRUPA

Na podlagi meritev so v tujini razvili empirične enačbe, ki napovedujejo jakost hrupa, ki bo dosežen z določeno verjetnostjo. Tako se v literaturi uporabljajo trije nivoji hrupa [4], [5]:

- L_{50} – zmeren dež; 50 odstotna verjetnost, da bo izračunani nivo dosežen v deževnem vremenu (količina padavin ni večja 2,5 mm/m²h),
- L_5 – nivo je dosežen v močnem dežju (količina padavin več kot 7,7 mm/ m²h),
- L_{50fair} – nivo je dosežen v lepem vremenu.

Za izračuna električne poljske jakosti izhajamo iz teorije elektrostatičnega polja. Zaradi povešenih vodov daljnovodov in različne konfiguracije terena, prek katerega potekajo so povzročeni neenaki odmiki vodnikov od tal. Zato je eksaktno reševanje enačb nemogoče. Glavni dejavnik, ki vpliva na nastanek in karakteristiko korone na vodniku, je porazdelitev

električne poljske jakosti na površini vodnika, ki jo določa vzdolžna elektrina in elektrina ob njej, zato se pri izračunu opiramo na naslednje tri predpostavke:

1. Izračuna se ekvivalentna višina H_{ek} vodnikov nad tlemi po enačbi (1),

$$H_{ek} = H - f \quad (1)$$

v kateri H pomeni višino obešišča vodnikov v m nad tlemi in f poves vodnikov v m. S tlemi vzporedni, ravni vodnik ekvivalentni višini predstavlja namreč najneugodnejši primer glede emisij hrupa.

2. Vodniki se predpostavljajo kot ekvipotencialne ploskve z znanim potencialom U , tla pa imajo potencial nič.
3. Vzdolžna elektrina q je po vodniku porazdeljena homogeno.

Najprej se izračuna vzdolžna elektrina posameznih vodnikov (glej (2) – (5)).

$$[p][q] = [U] \quad (2)$$

V (2) sta $[q]$ in $[U]$ stolpčna vektorja vzdolžne elektrine in napetosti, $[p]$ pa kvadratna matrika potencialnih koeficientov, ki se za diagonalo in zunaj diagonale elemente izračunajo z enačbama (3) in (4) [5],

$$p_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_k}{r_k} \quad k = 1, 2, \dots, n_v \quad (3)$$

$$p_{km} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{km}}{d_{km}} \quad k = 1, 2, \dots, n_v \quad k \neq m \quad (4)$$

kjer je:

- n_v - število vodnikov,
- h_k - višina vzdolžne elektrine od tal (m),
- r_k - polmer vodnika (m),
- D_{km} - razdalja med vzdolžno elektrino in zrcaljeno elektrino (m),
- d_{km} - razdalja med elektrinami (m),
- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ (As/Vm) - dielektrična konstanta.

Za izračun vzdolžne elektrine lahko uporabimo z (5) dobljeno iz (2),

$$[q] = [p]^{-1} [U] \quad (5)$$

kjer je $[p]^{-1}$ inverzna matrika potencialnih koeficientov, ki predstavlja tudi inverzno vrednost kapacitivnosti večvodniškega sistema. Za izračun kapacitivnosti so mogoče tudi poenostavitve izračuna, vendar jih nismo uporabljali.

Takoj ko izračunamo vzdolžne elektrine vodnikov posameznih faz, lahko izvedemo izračun povprečnega maksimuma električne poljske jakosti po metodi Markt Mengele [6], [7]. Ta metoda je poenostavljena in dovolj natančna za izračun električne poljske jakosti na daljnovodu, priključenem na izmenično napetost. Z izračunom električne poljske jakosti E_a , zaradi uporabe q_{ef} , dobimo neke vrednosti, ki z dejanskimi efektivnimi vrednostmi ob vodniku nimajo kaj dosti skupnega. Se pa lahko z njimi računa, ker jih nadaljne uporabimo v izkustvenih formulah. Metoda je primerna do štirih vodnikov v snopu in se izračuna v treh korakih.

1. Za dano konfiguracijo daljnovoda izračunamo vzdolžne elektrine po enačbi (5), pri čemer upoštevamo tudi zaščitne vrvi, katerim pripišemo potencial nič. Po enačbi (6) izračunamo efektivno vrednost vzdolžne elektrine,

$$q_{ef}^2 = \frac{1}{t_a - t_b} \int_{t_a}^{t_b} q^2 d\tau \quad (6)$$

kjer je:

- q_{ef} - efektivna vzdolžna vrednost elektrine (As/m),
- q - vzdolžna elektrina vodnika (As/m),
- t_a, t_b - čas pred in po integraciji.

2. Izračuna se povprečna električna poljska jakost posameznega vodnika z enačbo (7),

$$E_a = \frac{q_{ef}}{n} \frac{1}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (7)$$

kjer je:

- n - število vodnikov v snopu,
- q_{ef} - efektivna vzdolžna vrednost elektrine (As/m),
- r - polmer vodnika (m).

3. Izračuna se povprečni maksimum električne poljske jakosti snopa z enačbo (8), ki ga potrebujemo za izračun hrupa,

$$E_m = E_a \left[1 + (n-1) \frac{r}{R} \right] \quad (8)$$

kjer je:

- n - število vodnikov v snopu,
- r - polmer vodnika (m),
- R - razdalja med namišljenim središčem snopa vodnikov in očrtanim skozi vodnike (m).

Za nadaljni izračun smo uporabili tri različne metode opisane v nadaljnjih treh razdelkih.

3.1 Metoda BPA

Metoda BPA (Bonneville Power Administration) [6], [7] se najbolj približa realnemu stanju na daljnovodih in je zajeta v standardih [8].

Metoda je primerna za:

- vse geometrije daljnovodov,
- območje napetosti 230 – 1500 kV,
- premer vodnikov je lahko 2 cm do 6,5 cm,
- število vodnikov v snopu manjše od 16 in
- izračun emisij hrupa pri stopnji L_{50} .

Za izračun nivoja emisij hrupa i -te faze daljnovoda uporabimo empirično določeno enačbo (9).

$$AN_i = 120 \log(E_{mi}) + k \log(n) + 55 \log(2r) - 11,4 \log(D_i) + AN_0 \quad (9)$$

kjer so:

- E_{mi} - povprečni maksimum efektivne vrednosti električne poljske jakosti i -tega vodnika (kV/cm),
- n - število vodnikov,
- r - polmer vodnikov (cm),
- D_i - radialna razdalja od i -te faze do opazovane točke v prostoru (m).

Konstanti k in AN_0 sta odvisni od števila vodnikov in sta za

$$n \geq 3; k = 26,4, AN_0 = -128,4 \text{ in za}$$

$$n < 3; k = 0, AN_0 = -115,4$$

Skupni nivo hrupa AN v dB v opazovani točki je določljiv s seštevanjem prispevkov posameznih faz po enačbi (10),

$$AN = 10 \log \left[\sum_{i=1}^k 10^{\frac{AN_i}{10}} \right], \quad (10)$$

katera daje rezultat nivoja hrupa L_{50} . Da izračunamo nivo hrupa L_5 v močnem dežju in $L_{50\text{fair}}$, se upoštevata naslednji priporočili. Za nivo hrupa L_5 se prišteje 3,5 dB k L_{50} in za $L_{50\text{fair}}$ se odšteje 25 dB od L_{50} .

3.2 Metoda UHV

Metoda UHV (General Electric Company) [7] je primerna za:

- vse geometrije daljnovodov,
- območje napetosti 230 – 1500 kV,
- premer vodnikov je lahko 2 cm do 6 cm,
- število vodnikov v snopu manjše od 16 in
- izračun emisij hrupa pri stopnji L_{50} in L_5 .

Za izračun nivoja emisij hrupa i -te faze daljnovoda pri stopnji L_5 uporabimo empirično določeno enačbo (11).

$$AN_{5i} = -\frac{665}{E_{mi}} + 20 \log n + 44 \log(2r) - 10 \log D_i - 0.02 D_i + AN_0 + K_1 + K_2 \quad (11)$$

kjer so:

665, 20, 44, 10, 0.02 - empirično določene vrednosti parametrov.

Konstante K_1 , K_2 in AN_0 so odvisne od števila vodnikov in znašajo:

$$\begin{aligned} AN_0 &= 75,2 \quad \text{pri } n < 3 \\ &= 67,9 \quad \text{pri } n \geq 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_1 &= 7,5 \quad \text{pri } n = 1 \\ &= 2,6 \quad \text{pri } n = 2 \\ &= 0 \quad \text{pri } n \geq 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_2 &= 0 \quad \text{pri } n < 3 \\ &= \left[22,9(n-1) \frac{2r}{2R} \right] \quad \text{pri } n \geq 3 \end{aligned}$$

kjer je:

R - polmer snopa, je razdalja med namišljenim središčem snopa vodnikov in krožnico, ki gre skozi središča vodnikov (m),

Za izračun nivoja emisij hrupa i -te faze daljnovoda pri stopnji L_{50} pa uporabimo izkustveno določeno enačbo (12).

$$AN_{50i} = AN_5 - \Delta A \quad (12)$$

kjer je:

$$\begin{aligned} \Delta A &= 14,2 \frac{E_c}{E_m} - 8,2 \quad \text{pri } n < 3 \\ &= 14,2 \frac{E_c}{E_m} - 10,4 - 8 \left[(n-1) \frac{2r}{2R} \right] \quad \text{pri } n \geq 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_c &= 24,4 (2r)^{-0,24} \quad \text{pri } n \leq 8 \\ &= 24,4 (2r)^{-0,24} - 0,25(n-8) \quad \text{pri } n > 8 \end{aligned}$$

3.3 Metoda HQ

Metoda HQ - Hydro Quebec (Institute of Research IREQ) [7] je primerna za:

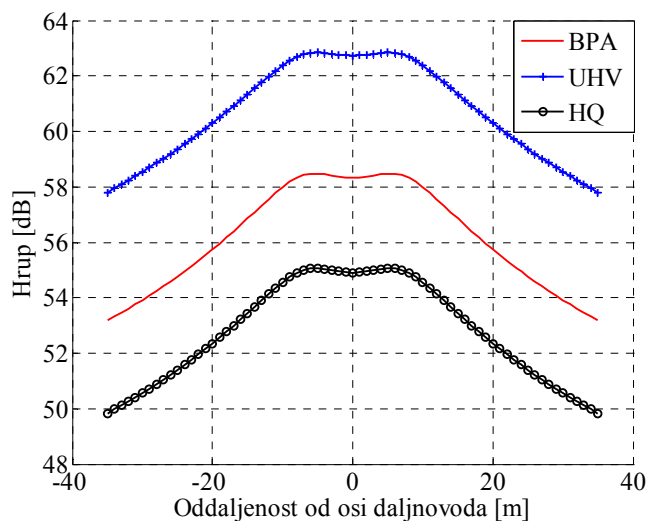
- vse geometrije daljnovodov,
- območje napetosti 345 - 1500 kV,
- število vodnikov v snopu večje od 2 in
- izračun emisij hrupa pri stopnji L_5 .

Za izračun nivoja emisij hrupa i -te faze daljnovoda uporabimo empirično določeno enačbo (13),

$$AN_i = 72 \log(E_{mi}) + 22,7 \log n + 45,8 \log(2r) - 11,4 \log D_i - 57,6 \quad (13)$$

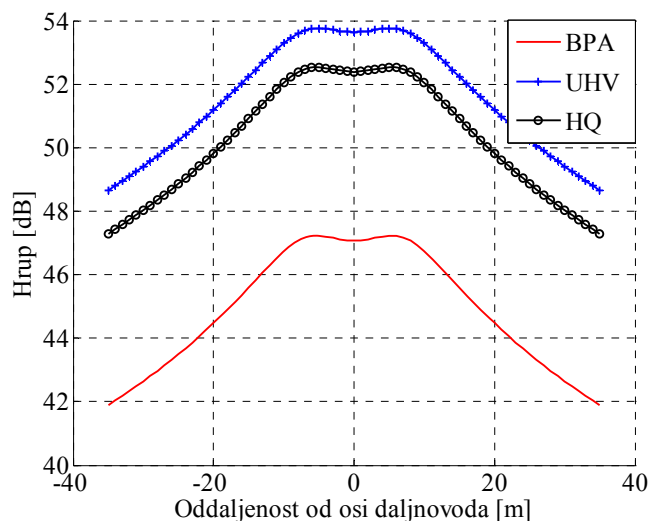
4. REZULTATI IZRAČUNA HRUPA

Na sliki 1 je prikazana primerjava stopnje emisij hrupa čez koridor na mestu največjega povesa (1,5 m nad tlemi) za daljnovodni steber tipa Sod za dva vodnika v snopu v vodoravnem položaju pri uporabi različnih metod za izračun emisij hrupa (L_5).



Sl.1: Primerjava stopnje emisij hrupa čez koridor na mestu največjega povesa (1,5 m nad tlemi) za daljnovod tipa Sod za dva vodnika v snopu v vodoravnem položaju pri uporabi različnih metod za izračun hrupa (L_5).

Na sliki 2 je prikazana primerjava stopnje emisij hrupa čez koridor na mestu največjega povesa (1,5 m nad tlemi) za daljnovod tipa Sod za tri vodnike v snopu pri uporabi različnih metod za izračun hrupa (L_5).



Sl.2: Primerjava stopnje emisij hrupa čez koridor na mestu največjega povesa (1,5 m nad tlemi) za daljnovod tipa Sod za tri vodnike v snopu pri uporabi različnih metod za izračun hrupa (L_5).

5. SKLEP

V članku smo obravnavali izračun emisij hrupa pod visokonapetostnimi daljnovidmi, katerega povzroči korona. Slednji je še posebno izrazit v primeru vlažnega in deževnega vremena. Večja in moteča jakost emisij hrupa je prisotna pri daljnovidih z napetostmi nad 400 kV, kar pomeni, da je potrebno te izračune upoštevati tudi v slovenskem električnem prenosnem omrežju, saj imamo daljnovod napetosti 400 kV. Izbrane metode za izračun emisij hrupa, so določene na podlagi podatkov dolgotrajnih meritev daljnovidov in veljajo tudi za izračune emisij hrupa daljnovidov s poljubno razporeditvijo vodnikov. Glede na to, da se lahko rezultati izračunov z različnimi metodami močno razlikujejo, je potrebno ustrezno metodo izbrati z razmislekom. Poleg tega je priporočljivo tudi primerjati rezultate meritev in izračunov za določene tipe daljnovidov.

6. VIRI, LITERATURA

- [1] Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju, Ur. list RS št. 105/05, 34/08 in 109/09.
- [2] P. Klenovšek, Diplomsko delo visokošolskega študija, Koronske izgube na daljnovidu 2x400 kV Maribor - Kainachtal (Avstrija), Tehniška fakulteta, Oddelek za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 1993.
- [3] T. Gönen, Limiting factors for extra-high and ultrahigh voltage transmission: Corona, radio noise and audible noise, Electric power transmission system engineering, New York, 1988, str. 538 - 561.
- [4] M.G. Comber, D.W. Deno, L.E. Zaffanella, Corona phenomena on AC transmission lines, Transmission Line Reference Book-345 kV and Above, EPRI, 1987.
- [5] I. Rozman, T. Marinček, Vpliv posameznih vhodnih podatkov in izračun hrupa VN daljnovidov, 8. konferenca slovenskih elektroenergetikov, Čatež, 2007, CIGRE, ŠK C3 - 4.
- [6] B. Zemljarič, Ocena velikosti hrupa visokonapetostnega daljnovoda, Elektrotehniški vestnik 71 (5), Ljubljana, 2004, str. 271 - 276.
- [7] IEEE Committee Report, A comparison of methods for calculating audible noise of high voltage transmission lines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 101, No. 10, Oktober 1982, str. 4090 - 4099.
- [8] EN 50341-1, Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV. Part 1: General requirements - Common specifications, Brussels, CENELEC, 2001.

NASLOV AVTORJEV

Prof. dr. Gorazd Štumberger
Klemen Deželak, uni.dipl.inž. el.
Jožef Kadiš, uni.dipl.inž.el.

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova
ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 70 50 Fax: + 386 2 252 54 81 ali + 386 2 220 7272

Elektronska pošta: joze.kadis@gmail.com, klemen.dezelak@uni-mb.si,
gorazd.stumberger@uni-mb.si