

Željko Ćosić, mag.ing.el.  
Ravel d.o.o.  
zeljko.cosic@ravel.hr

dr.sc. Nikola Vladimir, dipl.ing.brod.  
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb  
nikola.vladimir@fsb.hr

dr.sc. Ivan Ćatipović, dipl.ing.brod.  
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb  
ivan.catipovic@fsb.hr

## NUMERIČKO MODELIRANJE MEHANIČKIH NAPREZANJA APARATA VISOKONAPONSKIH RASKLOPNIH POSTROJENJA USLIJED DJELOVANJA POTRESA

### SAŽETAK

Električni aparati visokonaponskih postrojenja su međusobno povezani užetnim ili cijevnim spojnim elementima te zajedno čine funkcionalnu cijelinu. Mehaničke značajke takve cijeline pri pobudama karakterističnim za potres potrebno je provjeriti prije samog odabira električnog aparata. Numeričkim proračunima moguće je dobiti očekivane razine napreznja na određenim mjestima električnih aparata. Elementi kojima je potrebno posebnu pozornost posvetiti pri numeričkim modeliranjima su spojni elementi koji su nelinearni i uvelike ovise o geometriji samih dijelova postrojenja. Kroz rad je prikazan model takvog elementa te su rezultati numeričkih proračuna uspoređeni s rezultatima ispitivanja u naravi, koji su u dostupni u literaturi. Također, numeričkom metodom je analiziran sustav od dva električna aparata povezana užetom kao spojnim elementom.

**Ključne riječi:** Numerički model, potres, aparati rasklopnih postrojenja, metoda konačnih elemenata, vremenska integracija

## NUMERICAL MODELING OF MECHANICAL STRESSES OF HIGH VOLTAGE APPARATUS UNDER EARTHQUAKE INDUCED LOADS

### SUMMARY

High voltage electric apparatus in substations are interconnected with flexible or rigid connecting element making functional unit. Mechanical characteristics of that unit in regard to excitation that can be expected during seismic activity must be checked and analyzed before defining each element. Using numerical model and method expected levels of mechanical stresses on point of interest can be calculated. Special attention must be provided to numerical model of connecting elements due to their nonlinear behavior during motion. Through this work model of flexible connecting element is shown and results of calculations are compared with results of experimental investigations according procurable literature.

**Key words:** numerical model, earthquake, substation apparatus, finite element method, time integration

## 1. UVOD

U cilju ispravnog i pouzdanog funkcioniranja rasklopnih elektroenergetskih postrojenja, razine mehaničkih naprezanja njihovih elemenata, uzrokovanih elektromagnetskim (struje normalnog pogona i kratkog spoja) ili okolišnim (vjetar, led, potres) djelovanjima, moraju biti u dopuštenim granicama. Stoga, u cilju pravilnog dimenzioniranja pojedinih elemenata elektroenergetskog postrojenja, u projektnoj fazi se nameće potreba točnog proračuna mehaničkih naprezanja, a zatim i njihova usporedba s važećom regulativom.

Zahtjevi za određenim značajkama kojima moraju zadovoljiti pojedini elementi primarno su određeni samom lokacijom postrojenja, a uključuju definiciju potresne zone, karakteristična opterećenja vjetrom i ledom, iznos očekivanih struja kratkog spoja, itd.. Nedostatak postojećeg pristupa je u činjenici da se tvornička ispitivanja provode na samostojećim elementima u kontroliranim uvjetima, dok njihovo realno eksploatacijsko stanje podrazumijeva sustav povezanih elemenata.

Dosadašnja istraživanja pokazuju da dinamička interakcija povezanih visokonaponskih aparata (užetima ili cijevnim sabirnicama) može uzrokovati razine naprezanja koje premašuju razine definirane u fazi projektiranja. Glavni razlozi povećanja naprezanja su dinamička međudjelovanja električnih aparata kada su oni međusobno povezani užetima ili cijevnim sabirnicama. Današnja praksa pretpostavlja da međusobno spojeni aparati imaju manja naprezanja u odnosu kada su samostojeći jer se pretpostavlja da spojni elementi prigušuju naprezanja. Trenutno postoje određene norme koje se mogu primijeniti na projektiranje postrojenja kako bi bila otpornija na djelovanje potresa (IEEE) međutim sve pretpostavke u navedenim normama su dobivene temeljem ispitivanja dva povezana aparata što nije realno eksploatacijsko stanje aparata u postrojenju. Cilj daljnjih istraživanja jest da se obuhvati što veći broj međusobno povezanih aparata kako bi se dobila što vjernija slika stvarnog mehaničkog naprezanja.

U radu će se analizirati odziv visokonaponskih električnih aparata (uslijed djelovanja potresa), za slučaj njihove međusobne povezanosti užetima ili cijevnim sabirnicama, metodom konačnih elemenata, uz integraciju jednadžbe dinamičke ravnoteže u vremenskoj domeni. Rezultati će se usporediti s rezultatima eksperimentalnih istraživanja, dostupnim u literaturi, te će se ovisno o njihovom podudaranju razmotriti mogućnost usložnjavanja modela uzimanjem u obzir većeg broja međusobno povezanih elemenata, u cilju što vjerodostojnijeg simuliranja radnog stanja elektroenergetskog postrojenja u naravi.

## 2. NUMERIČKI MODEL UŽETNOG SPOJNOG ELEMENTA

U visikonaponskim postrojenjima električni aparati su povezani užetnim spojnim elementima. Užad se najčešće sastoji od kombinacije aluminijskih i čeličnih žica pri čemu su čelične koncentrirane u sredini užeta i imaju ulogu nosivosti dok aluminijske primarno služe za provođenje struje. Pored užadi od aluminijskih i čeličnih žica za povezivanje električnih aparata se koristi i užad građena samo od aluminijskih žica iz razloga što takve veze imaju relativno malu duljinu u odnosu na duljine između stupova dalekovoda pa je tada i masa samog spojnog elementa manja. Radi jednostavnosti dati će se model užeta koji je građen od žica istog materijala.

### 2.1. Fizikalne karakteristike užetnog spojnog elementa

Kako bi se definirao numerički model užeta potrebno je odrediti:

- efektivni presjek
- jediničnu masu
- krutost
- moment tromosti
- koeficijent prigušenja

Za potrebe proračuna potrebno je odrediti presjek užeta. Kako je samo uže načinjeno od više upletenih žica kružnog presjeka koristiti će se efektivni presjek koji je zbroj presjeka pojedinih žica:

$$A = n \frac{\pi d^2}{4} \quad (1)$$

gdje je  $A$ - efektivni presjek užeta,  $d$  - promjer pojedine žice užeta,  $n$  - broj žica užeta.

Jedinična masa kabela je definirana prema zbroju jediničnih masa žica prema izrazu:

$$m = n \cdot m_i \quad (2)$$

gdje je  $m_i$  - jedinična masa žice.

Fleksijska krutost užeta definirana je umnoškom Youngova modul elastičnosti,  $E$ , i momenta tromosti,  $I$ , te je za ovu svrhu prema [5] uzeta vrijednost  $5,72 \cdot 10^6 \text{ N/cm}^2$ .

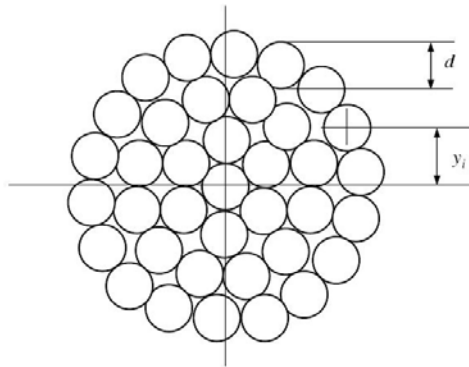
Iznos momenta tromosti užeta ovisi o ponašanju samih žica od kojih se sastoji uže odnosno da li pri gibanju samog užeta žice ostaju međusobno priljepljene ili se gibaju u odnosu jedne prema drugoj. Minimalni iznos momenta tromosti definiran je pod pretpostavkom da se žice gibaju bez trenja te je tada on zbroj momenata tromosti pojedinih žica što je dato izrazom:

$$I_{\min} = n \frac{\pi d^4}{64} \quad (3)$$

Maksimalni iznos momenta tromosti dan je prema [5] izrazom

$$I_{\max} = \sum_{i=1}^n n \frac{d^2}{4} \left( \frac{d^2}{16} + y_i^2 \right) \quad (4)$$

pri čemu je  $y_i$  udaljenost  $i$ -te žice od  $x$ -osi, a  $d$  promjer žice što je prikazano na slici 1.



Slika 1 Presjek užeta

Kako je uže nelinearni element moment tromosti varira u ovisnosti o geometriji i silama koje djeluju na uže. Stoga je teško odrediti iznos momenta inercije koji bi odgovarao stvarnom slučaju pogotovo prema činjenici da iznos momenta tromosti izračunat preko izraza (3) u odnosu iznos izračunat preko (4) može biti i do 100 puta manji. Stoga se prema studijama [4] i [5] definira aproksimativna vrijednost prema izrazu:

$$I \cong (1 + N) I_{\min} \quad (5)$$

gdje je  $N$  broj slojeva žica u užetu.

Prigušenje užeta je također u naravi promjenivog iznosa što ovisi o gibanju samog vodiča. Kroz numeričke analize uzet je konstantan iznos prigušenja koji, prema preporukama [5], iznosi  $10 \text{ Ns/m}^2$ .

## 2.2. Numerička metoda

Za proračun odziva užeta primijenjen je komercijalni programski paket LS-Dyna, koji se temelji na metodi konačnih elemenata, pod pretpostavkom velikih pomaka, i eksplicitnoj integraciji jednadžbe gibanja u vremenu. Potpuni prikaz numeričke metode dan je u [6] i [7], a u ovom radu, radi cjelovitosti, naveden je postupak rješavanja uz prikaz osnovnih jednadžbi.

Prvi korak u postupku rješavanja je postavljanje početnih uvjeta za  $t=0$ . Vremenska integracija jednadžbi gibanja provedena je Newmark  $\beta$ -metodom za  $\beta = 0$ . Prema [6], brzina i pomak (translacijski) čvora  $i$  u vremenskom trenutku  $j+1$  jednaki su:

$$\dot{u}_{it}^{j+1} = \dot{u}_{it}^j + \frac{1}{2} \Delta t (\ddot{u}_{it}^j + \ddot{u}_{it}^{j+1}) \quad (6)$$

$$u_{it}^{j+1} = u_{it}^j + \Delta t \dot{u}_{it}^j + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{u}_{it}^j \quad (7)$$

Proračun rotacijskog pomaka i kutne brzine je nešto složeniji i u cijelosti je prikazan u [6]. Drugi korak u postupku rješavanja predstavlja ažuriranje pomaka u jednadžbi (7), nakon čega se ažuriraju jedinični vektori  $b_i$  definirani sljedećom jednadžbom:

$$b_i^{j+1} = b_i^j + \Delta t (\omega \cdot b_i^j) + \frac{1}{2} \Delta t^2 \left[ \omega \times (\omega \times (\omega \times b_i^j)) + \alpha \times b_i^j \right] \quad (8)$$

Spomenuti vektori se transformiraju na globalne komponente preko jednadžbe:

$$\{\bar{A}\} = [\lambda]^T \{A\} \quad (9)$$

Zatim je u skladu s literaturom [6] moguće naći polje pomaka  $d$ , odnosno može se odrediti deformacija pojedinog elementa u trenutku  $i+1$ .

### 2.3. Usporedba numeričkog modela užeta sa rezultatima ispitivanja

Prije daljnjih analiza na temelju numeričkog modela užeta potrebno je usporediti rezultate dobivene numeričkom metodom uz pomoć računalnog programa LS-Dyna s rezultatima ispitivanja prema dostupnoj literaturi [1]. Karakteristike užeta prikazane su u tablici 1.

Tablica 1 Karakteristike užeta za spojeve

	Uže 1 (1796-MCM)	Uže 2 (4000-MCM)
materijal	aluminij	aluminij
broj slojeva	5	10
broj žica	61	271
presjek žice (mm <sup>2</sup> )	0,304	0,304
promjer (mm)	39,2	58,6
presjek (mm <sup>2</sup> )	910	2027
jedinična masa (kg/m)	2,509	5,698

#### 2.3.1. Ispitivanje kratkotrajnom harmonijskom pobudom (eng. Sine start test)

Prilikom ispitivanja koristilo se uže 1 karakteristika prema Tablici 1. Uže duljine 5,52 m ovješeno je između potpora udaljenosti 5,19 m. Svaka od potpora giba se harmonijski s tim da početni položaj nije isti (eng. „out-of-phase“). Amplituda gibanja iznosi 0,02 m dok frekvencija iznosi 3,5 Hz. Tijekom ispitivanja mjerila se horizontalna sila koja djeluje na mjestu ovjesa užeta. Vremenski zapis horizontalne sile prema ispitivanju prikazan je na slici 2 a).

Kako se može vidjeti na slici 2 a) horizontalna sila u stacionarnom stanju iznosi približno 40 N. Tijekom ispitivanja uže se počinje gibati te se time uzrokuju tlačne i vlačne sile na mjestima ovješnja. Najveći iznos sile zabilježen prema ispitivanju iznosi 378 N. Važno je primjetiti da u kvazi-stacionarnom stanju, odnosno usljed blagih gibanja kabela iznos horizontalne sile bi varirao oko iznosa u stacionarnom stanju (oko 40 N). Intenzivnijim gibanjem naglo se povećavaju horizontalne sile na što bitno utječe tromost i fleksijska krutost kabela.

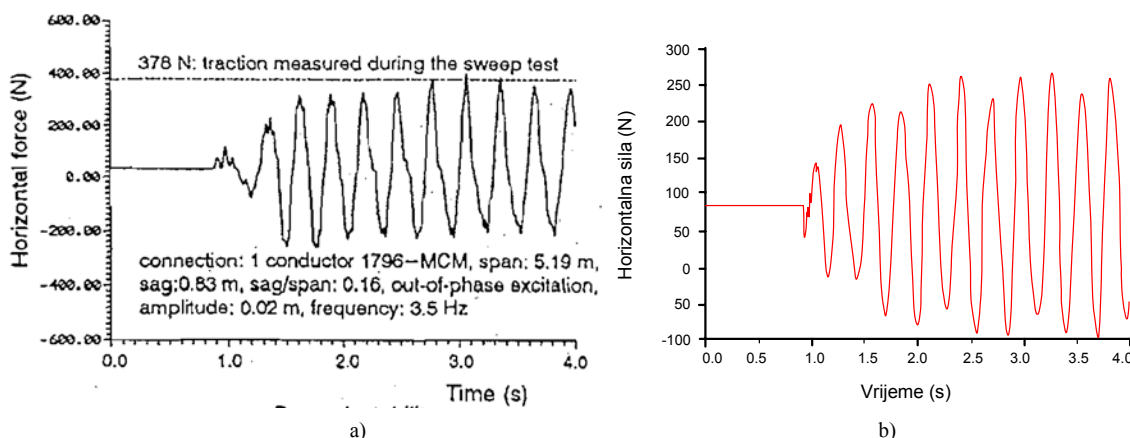
Pri numeričkom proračunu (metodom konačnih elemenata) koristile su se karakteristike kabela prema prije navedenoj tablici 1 za uže 1. Tako prema izrazu (1) efektivni presjek iznosi  $A=4,43 \text{ cm}^2$ , moment inercije prema izrazu (5) iznosi  $I=0,153 \text{ cm}^4$ , a jedinična težina  $w=24,6 \text{ N/m}$ .

Harmonijsko gibanje ovješnja užeta opisano je izrazom:

$$u(t) = [1 - \exp(-2\pi\alpha ft)] A \sin(2\pi ft) \quad (10)$$

gdje je  $A = 0,02$  m amplituda,  $\alpha = 0,1$  koeficijent prilagođenja,  $f = 3,5$  Hz - frekvencija.

Izraz u zagradama se koristi kako bi se izbjegla numerička nestabilnost koja može biti uzrokovana početnim uvjetima koji nisu nulti. Bitno je primjetiti da za samo nekoliko ciklusa izraz postaje približno jednak 1, te gibanje postaje čisto harmonijsko. Vremenski zapis horizontalne sile prema rezultatima metode konačnih elemenata prikazan je na slici 2 b) te se može usporediti s rezultatima ispitivanja.



Slika 2 Horizontalna sila na mjestu ovješnja užeta – a) eksperimentalno ispitivanje prema [1], b) metoda konačnih elemenata (LS-Dyna)

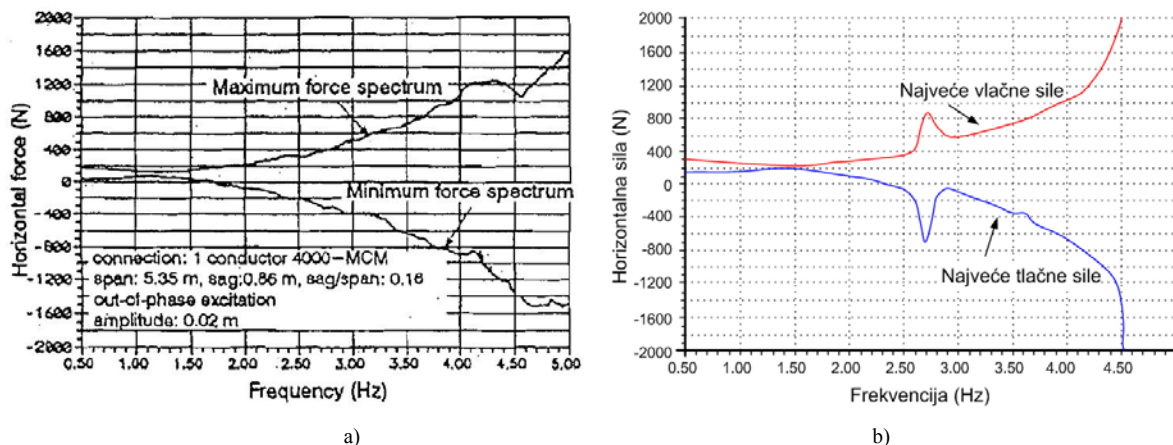
Usporedbom vremenski zapisa prikazanih na slici 2 a) i b) može se vidjeti da se rezultati kvalitativno dobro podudaraju. Iznosi maksimalnih sila su manji nego što su dobijene ispitivanjem (oko 35 do 40%). Uzrok tih razlika je pretpostavljeni iznos momenta inercije i prigušenja te njihova konstantnost duž kabla što sigurno nije slučaj u naravi gdje su iznosi promjenjivi prilikom gibanja užeta. Također razlog nepodudaranja iznosa može biti pretpostavljeni početni položaj kabla iz razloga što on nije dobro opisan u literaturi ispitivanja. Uzrok tome je i nešto veća sila u stacionarnom stanju što se može vidjeti na vremenskim zapisima.

### 2.3.2. Ispitivanje harmonijskom pobudom promjenjive frekvencije (eng. Sine sweep test)

Kako bi se dobile karakteristike užeta pri različitim frekvencijama uže karakteristika prema tablici 1 (za uže 2) je podvrgnuto ispitivanju pri čemu se mijenjala frekvencija gibanja ovjesnih mjesta. Odabrani frekvencijski raspon (od 0,5 do 5 Hz) podudara se sa očekivanim frekvencijama gibanja električnih aparata visokonaponskih postrojenja. Amplituda harmonijskog gibanja je konstantna i iznosi kao i u prethodnom ispitivanju 0,02 m.

Prema slici 3 a) gdje je prikazan zapis maksimalnih iznosa vlačnih i tlačnih sila u ovisnosti o frekvenciji, može se zaključiti da iznosi značajno variraju. U određenom trenutku (pri otprilike 4,3 Hz) dolazi do naglog skoka iznosa sila što može uputiti na pojavu rezonancije.

U numeričkom proračunu metodom konačnih elemenata pretpostavlja se da je presjek užeta konstantan (prema (1) iznosi  $A=19,54 \text{ cm}^2$ ), moment inercije također konstantan te prema (5) iznosi  $I=1,25 \text{ cm}^4$  dok je jedinična masa  $w=52,2 \text{ N/m}$ . Prigušenje užeta je zanemareno dok je gibanje ovjesnih mjesta definirano izrazom (6) pri čemu je frekvencija promjenjiva od 0,5 do 5 Hz.



Slika 3 Horizontalna sila na mjestu ovješnja – a) eksperimentalno ispitivanje prema [1], b) metoda konačnih elemenata (LS-Dyna)

Prema zapisima prikazanim na slici 3 može se uočiti kvalitativno podudaranje rezultata ispitivanja i numeričkog proračuna. Na zapisu numeričkog proračuna (slika 3 a) pri frekvenciji od 2,7 Hz može se uočiti pojava karakteristična za rezonanciju dok na zapisu se ona pojavljuje pri frekvenciji od otprilike 4,3 Hz. Nepodudaranja između rezultata možemo kao i u prethodnom slučaju pripisati pretpostavljenim karakteristikama uzeta (moment inercije, prigušenje, presjek) međutim unatoč tome numerički proračun je kvalitativno dobro ponovio rezultate ispitivanja.

#### 4. ZAKLJUČAK

Povećanje mehaničkih naprezanja aparata u slučajevima kada su oni međusobno povezani spojnim elementima mora se uzeti u obzir u fazi projektiranja. Modeliranjem i numeričkim proračunima uz pomoć računalnih programa moguće je dobiti očekivane iznose naprezanja. Kako bi se takvi modeli potvrdili kao ispravni potrebno je provesti niz usporedbi kakve su prikazane kroz ovaj rad. Daljnim usložavanjem modela moguće je odrediti razine naprezanja koja se mogu očekivati u realni slučajevima u postrojenjima.

#### 5. LITERATURA

- [1] Dastous, J.B.; Pierre, J.R.: "Experimental investigation on the dynamic behavior of flexible conductors between substation equipment during an earthquake", IEEE, 04.1996.
- [2] Terek, V., Jugović, R., Bojanić, B.: "Analiza seizmičkih utjecaja na dinamičku otpornost strujnog mjernog transformatora AGU-420", KONČAR - stručne informacije", Zagreb, 1987.
- [3] Ravlić, V.: "Cijevne sabirnice u visokonaponskim postrojenjima", RAVEL/KIGEN, Zagreb, 2006.
- [4] Kiureghian, A.D., Hong, K.j., Sackman, J.L.: "Seismic Response and Reliability of Electrical Substation Equipment and Systems", PEER, Berkeley, 2006.
- [5] Song, J., Kiureghian, A.D., Sackman, J.L.: "Further Studies on Seismic Interaction in Interconnected Electrical Substation Equipment", PEER, Berkeley, 2000.
- [6] Belytschko, T., Schwer, L., Klein, M.J.: "Large displacement, transient analysis of space frames", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 11, 1977, pp. 65-84.
- [7] Belytschko, T., Hsieh, B.J.: "Non-linear transient finite element analysis with convected co-ordinates", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 7, 1973, pp. 255-271.
- [8] Čulina, A., Ambrozić, D.: "Projektiranje trafostanica u seizmički aktivnim područjima", HRO CIGRE, Cavtat, 2010.
- [9] IEEE Std 693-2005: IEEE "Recommended Practice for Seismic Design of Substations", 2005.

- [10] IEEE Std 1527-2006: IEEE "Recommended Practice for Design of Flexible Buswork Located in Seismically Active Areas", 2006.
- [11] Čosić, Ž., Đikić, B., Ravlić, V.: "Utjecaj spojeva na aparate rasklopnog postrojenja uslijed djelovanja potresa", BH K CIGRE, Sarajevo, 2011.