

Željko Ćosić  
RAVEL d.o.o.  
zeljko.cosic@ravel.hr

Velimir Ravlić  
RAVEL d.o.o.  
velimir.ravlic@ravel.hr

Ante Ravlić  
RAVEL d.o.o.  
ante.ravlic@ravel.hr

## UTJECAJ MEHNIČKE FREKVENCije SABIRNIČKIH SUSTAVA NA NAPREZANJA USLIJED SILA KRATKIH SPOJEVA

### SAŽETAK

Dinamičko naprezanje konstrukcija je funkcija prostora i vremena, i uzrokovano je stvarnom silom koja se vremenski mijenja. Naprezanja u vodičima i u izolatorima te nosivoj konstrukciji ovise o odnosu vlastite frekvencije mehaničkog sustava i frekvencije elektromagnetske sile. U slučaju rezonancije ili blizu rezonancije mogu se pojačati sile i naprezanja.

Ovisno o izvedbi postrojenja bit će i naprezanja u vodičima i izolatorima različita kod istih struja kratkog spoja. Zbog toga treba uzeti u obzir elastičnost dijelova kompletnog mehaničkog sustava. Za analizu navedene problematike potrebno je što točnije definirati osnovnu vlastitu frekvenciju razmatranog sustava i njegovih dijelova.

**Ključne riječi:** sabirnički sustav, vlastita frekvencija, struje kratkog spoja, naprezanje, užetne sabirnice, cijevne sabirnice

## BUSBARS MECHANICAL FREQUENCY INFLUENCE ON SHORT CIRCUIT CURRENT STRESSES

### SUMMARY

Dynamic stress of the constructions is a function of space and time, and caused due to the real force that is time-dependent. Stresses in conductors and insulators and the supporting structures depends on the relative natural frequency of the mechanical system and the frequency of the electromagnetic force. In the case of resonance or near resonance the forces and stresses may increase.

Depending on the type of the switchgear stresses in conductors and insulators are different for the same short-circuit current. Therefore, one should take into account the elasticity of the parts of the complete mechanical system. For the analysis of this subject it is necessary to accurately define the natural frequency of the considered system and its parts.

**Key words:** busbar system, natural frequency, short circuit current, stress, flexible bus systems, tubular bus systems

## 1. Uvod

Dinamičko opterećenje konstrukcija karakterizira broj stupnjeva slobode (broj mogućih nezavisnih pomaka). Točno se broj stupnjeva slobode određuje najmanjim brojem veza za fiksiranje svih masa. U praksi se najčešće susrećemo sa sustavima koji imaju više stupnjeva slobode s više perioda i više oblika vibracija (tonova).

Sukladno metodologiji proračuna prema DIN normama i VDE propisima te poslije izrađenoj IEC normi dinamičke sile uzrokovane silama kratkog spoja se računaju iz statičkih sila uzimajući u obzir dinamičke faktore. To znači da ovakve metode proračuna (definirane na osnovi VDE 0103 i IEC 60865-1) daju vrlo brzu procjenu realnih rezultata i vrlo su pogodne za inženjersku praksu.

Već u starom VDE0103 iz 1961. godine date su osnovne smjernice, a u kasnijim izdanjima VDE DIN 0103, IEC 60865-1 i EN 60865-1 za jednostavne konfiguracije u postrojenjima vanjske izvedbe detaljno su opisane pojednostavljene metode proračuna.

Metode proračuna opisane u navedenim propisima, normama i preporukama opisuju kratkospojna naprezanja i sile pomoću zakona statike i dinamike uzimajući u obzir dinamičke faktore. Ograničenje naprezanja samo na elastično područje smanjilo bi ekonomičnost rješenja te se zato materijali koriste i u području plastičnih deformacija kako bi se postiglo bolje iskorištenje materijala, a time i ekonomičnija izvedba sabirničkog sustava. Principi metodologije proračuna i neki dijelovi metoda proračuna opisani su u nizu stručnih publikacija.

Elektromagnetske sile na vodiče u slučaju kratkog spoja djeluju na dijelove sabirničkog sustava, uključujući nosivu čeličnu konstrukciju. Treba naglasiti da svi elementi sabirničkih sustava imaju određeni stupanj elastičnosti. Vremenski zavisne struje kratkog spoja uzrokuju vibracije te postoje maksimalne vrijednosti sila u zavisnosti o mjestu na kompletnoj konstrukciji sabirničkog sustava, ali i o vremenu.

To znači da postoje i maksimalni otkloni vodiča, progibi portala, maksimalna naprezanja u vodičima te maksimalne sile u nosivoj konstrukciji. Ako su sile poznate, onda je moguće izračunati kratkospojnu čvrstoću sabirničkog sustava s određenom točnošću. Uobičajeno je dovoljno poznavati maksimalnu silu, ali ne i točno mjesto i vrijeme.

U IEC 60865-1 su prezentirane metodologije proračuna prilagođene zahtjevima prakse te sadrže određena pojednostavljena s određenim stupnjem sigurnosti.

Proračuni su dani u dva koraka u skladu s pravilima struke:

- maksimalna kratkospojna sila djeluje kao statička sila  $F$  na vodiče i kao takva se računa;
- dinamički odziv konstrukcije zavisen o vremenu uzbude može se opisati dinamičkim faktorima.

Pomoću ovih faktora proračunate statičke veličine se povećavaju da bi se dobile stvarne dinamičke sile uz utjecaj odziva konstrukcije. To znači da se statička sila množi s određenim dinamičkim faktorima i dobivena sila djeluje kao ekvivalentna statička sila na dijelove sabirničkog sustava i daje mjerodavna opterećenja za projekt konstrukcije.

Jasno je da je uložen ogroman trud prilikom definiranja faktora, tj. bila su potrebna ispitivanja u izgrađenim postrojenjima, analitički i numerički proračuni kao i ispitivanja u eksperimentalnim postrojenjima. Ova metoda omogućuje izračun kratkospojne čvrstoće za standardna dispozicijska rješenja uz prihvatljivu duljinu vremena za proračun i moguće ju je koristiti bez definiranja mnoštva parametara koji bi postali predmetom dodatnih istraživanja te rezultirali optimalnim i vrlo točnim rezultatima. Uz korištenje odgovarajućeg programa, proračun može biti proveden brzo i lagano.

Slično kao i u slučaju cijevnih sabirnica i u slučaju užetnih sabirnica i u slučaju spojeva između aparata s užetima polazi se od prirodne (vlastite) frekvencije dijelova sabirničkog sustava i omjeru vlastite frekvencije i pogonske frekvencije (50 Hz u Republici Hrvatskoj).

Dispozicijska rješenja koja nisu standardne konfiguracije kao i u slučajevima kada su rezultati vrlo blizu graničnih naprezanja dijelova sabirničkog sustava, zahtijevaju detaljnije proračune te eventualno i primjenu suvremenijih metoda proračuna (kao npr. metodu konačnih elemenata).

Složenije metode proračuna treba koristiti i u slučajevima izrazito teških uvjeta okoline (velike brzine vjetra, izloženost jakim potresima, visoke struje kratkih spojeva). Uporaba složenijih metoda proračuna zahtjeva uporabu specijalističkih programa za numeričke analize. Zbog toga je za rješavanje ovog problema potreban interdisciplinarni pristup elektroenergetskih i građevinskih stručnjaka za proračune konstrukcija suvremenim numeričkim metodama.

## 2. Sile uslijed struje kratkog spoja

Za razliku od cijevnih sabirnica, kada su jednadžbe za proračun naprezanja linearne, to nije takav slučaj kod užetnih sabirnica. Kod sabirnica s užetima, jednadžbe nisu linearne i nema zbrajanja komponenata naprezanja.

Pri kratkom spoju u rasponu užetnih sabirnica javljaju se tri različite sile:

- sila zatezanja  $F_{pi}$  uslijed približavanja vodiča u snopu;
- sila zatezanja tijekom kratkog spoja  $F_t$ ;
- sila zatezanja nakon kratkog spoja  $F_f$  prilikom pada vodiča.

Izračunate zatezne sile  $F_{pi}, F_t, F_f$  uključuju zatezne sile uslijed vlastite težine vodiča i pribora. Ekvivalentna frekvencija  $f_c$  u postrojenjima s užetnim sabirnicama za vrijeme kratkog spoja može se aproksimirati usporedbom s matematičkim njihalom [6]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\text{rezultantna sila/jedinica duljine}}{\text{masa vodiča/duljina} \cdot \text{provjes vodiča}}} \quad (1)$$

Ekvivalentna frekvencija otklona je niža prije i nakon kratkog spoja. Maksimalna frekvencija (u Hz) može se procijeniti pomoću formule  $f_c = 0,56 \cdot \sqrt{\text{provjes}}$  pri čemu je provjes u metrima. U postrojenju s užetnim sabirnicama je  $\frac{f_c}{f} \ll 1$  jer se radi o kratkim rasponima i tada se proračuni naprezanja zasnovani na efektivnoj vrijednosti struje kratkog spoja  $I_{ef}$ .

U postrojenjima s užetnim sabirnicama, naprezanja kod dvopolnih i trolnih kratkih spojeva su približno jednaka. Kod dvopolnih kratkih spojeva, vodiči se otklanjaju, što rezultira u smanjenju minimalnih razmaka (npr. kad susjedni vodiči vode struje kratkog spoja i gibaju se jedan prema drugome nakon kratkog spoja). U slučaju trolnih kratkih spojeva, središnji vodič se minimalno otklanja zbog inercije i izmjeničnih sila drugih faza koje usmjereno djeluju na središnji vodič.

Posebno je važan odziv sabirničkog sustava na uzbudne struje kratkog spoja. Sljedeće mehaničke karakteristike su odlučujuće u svezi definiranja ponašanja sabirničkih sustava s užetnim vodičima kod pojave struja kratkih spojeva:

- 1) Vlačne sile u vodičima, uključivo pripadajući ovjesni pribor, mogu uzrokovati oštećenja.
- 2) Sile u izolatorskim lancima i mjestima spoja s nosivim konstrukcijama mogu uzrokovati popuštanje ili prekid izolatora.
- 3) Otkloni užetnih vodiča zbog elastičnosti i termičkih istezanja vodiča za vrijeme kratkih spojeva mogu uzrokovati sekundarne kratke spojeve.

U slučaju cijevnih sabirnica u pitanju su sljedeće mehaničke karakteristike u svezi definiranja ponašanja sabirničkih sustava kod pojave struja kratkih spojeva:

- 1) Naprezanja uslijed savijanja vodiča mogu proizvesti neželjene deformacije.
- 2) Sile koje djeluju na spojeve cijevnih vodiča s potpornim izolatorima (ili drugim aparatima) mogu uzrokovati naprezanje spojnog pribora i nosive konstrukcije (uključivo i izolatore i postolja i temelje).
- 3) Momenti savijanja posebno blizu donje prirubnice izolatora mogu uzrokovati prekid (lom) izolatora i/ili nosive konstrukcije.

Kratki spoj uzrokuje vibracije cijevnih vodiča te odskakivanje i rotaciju užetnih vodiča. Omjer:

$$\frac{f_L}{f} = \frac{\text{najniža značajna mehanička frekvencija vodiča}}{\text{nazivna električna frekvencija (50 Hz kod nas)}} \quad (2)$$

je najvažniji parametar za sve tipove gibanja vodiča. Kada je  $\frac{f_L}{f} \gg 1$  tada je naprezanje proporcionalno uzbudnoj sili. U slučaju kada je  $\frac{f_L}{f} \ll 1$  naprezanja su manja, izuzev u posebnim slučajevima rezonancije kod cijevnih sabirnica što se može smanjiti brzim prekidanjem struje kratkog spoja [10].

Potporni izolatori i nosive potporne konstrukcije imaju relativno malen utjecaj i na cijevne sabirnice i na sabirnice iz užadi zbog toga što je osnovna prirodna frekvencija tih konstrukcijskih dijelova sabirničkih sustava  $f_s > f_c$ . Najviša zamjetljiva mehanička frekvencija  $f_c$  krutih vodiča je tipičnih vrijednosti 2 do 10 Hz u visokonaponskim postrojenjima.

U skladu s ispitivanjima u FGH [8] prva prirodna frekvencija čitave konstrukcije očito je niža od najniže frekvencije dijelova konstrukcije, tako da je u slučaju portala niža od prirodne frekvencije stupova portala koja iznosi oko 4 Hz (tipična vrijednost) prema [8].

Prirodna frekvencija cijevnih sabirnica iznosi tipično oko 3 do 5 Hz. U slučaju sabirnica iz užeta iznosi osnovna frekvencija vibracija u području 0,3 Hz do 0,5 Hz što je oko 10 puta niža vrijednost od one za krute vodiče [8].

Pomoću odgovarajućih dinamičkih faktora preračunavaju se statičke veličine kako bi se dobile dinamičke sile kao odzivi konstrukcije [8]:

$$\nu = \frac{\text{odziv uzrokovan dinamičkim opterećenem}}{\text{odziv uzrokovan statičkim opterećenem}} \quad (3)$$

U slučaju krutih vodiča razlikuju se tri frekvencijska faktora:

$\nu_F$  – frekvencijski faktor mjerodavan za dinamičko opterećenje nosive konstrukcije (izolatori i postolja);

$\nu_\sigma$  – frekvencijski faktor mjerodavan za dinamičko naprezanje cijevi;

$\nu_r$  – frekvencijski faktor za maksimalno povećanje naprezanje uslijed APU-a.

Navedeni faktori su dati kao funkcije osnovne vlastite frekvencije cijevi  $f_L$  i električne frekvencije  $f$ . Osnovna vlastita frekvencija cijevi data je poznatim izrazom [10]:

$$f_L = \frac{s_1^2}{2\pi \cdot \ell^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot A}}, \text{ Hz} \quad (4)$$

gdje su:

$\ell$  – dužina cijevi između dvije potporne točke,  $m$

$E$  – modul elastičnosti materijala cijevi,  $N/mm^2$

$\rho$  – specifična masa materijala cijevi,  $kg/m^3$

$A$  – površina poprečnog presjeka cijevi,  $m^2$

$J$  – moment tromosti cijevi  $J = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4)$  pri čemu je  $D$  vanjski promjer cijevi, a  $d$  unutarnji promjer cijevi u  $m$ .

Treba naglasiti da se često koristi drugi oblik formule za izračunavanje vlastite frekvencije cijevi:



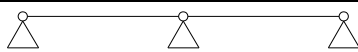
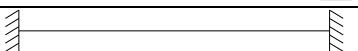
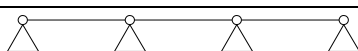
$$f_L = \frac{\gamma_1}{\ell^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot A}} \quad (5)$$

Pri tome vrijedi odnos zbog različitih mjernih jedinica:

$$\frac{s_1}{2\pi} = \frac{\gamma_1}{100} \quad (6)$$

U Tablici 1. su prikazani faktori  $s_1$  i  $\gamma_1$  mjerodavni za proračun vlastite frekvencije sabirničke sustava:

**Tablica 1** Faktori  $s_1$  i  $\gamma_1$  mjerodavni za proračun vlastite frekvencije sabirničke sustava

$n = 1$	$n > 1$ jednaki razmaci	$s_1$	$\gamma_1$
		3,14	157
		3,92	245
		4,73	356

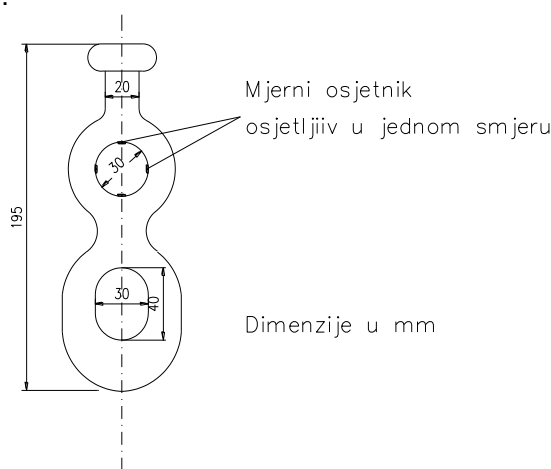
### 3. Mjerenje i mjerna oprema

Osnovni problem mjerenja je izvođenje mjerenja u okolini visokih elektromagnetskih utjecaja. Pri tome se radi o visokim ispitnim izmjeničnim strujama kratkog spoja, izmjeničnim naponima višim od 10 kV i smetnjama uslijed sklopnih operacija na ispitnu opremu.

Najčešće se mjere naprezanja uslijed savijanja potpornih izolatora, nosive čelične konstrukcije i cijevnih vodiča u slučaju cijevnih sabirnica, a mjerenja se vrše pomoću mjernih osjetnika (engl. strain gauges).

#### 3.1. Mjerne metode i oprema

U slučaju užeta, naprezanje u vodiču (ili u vodičima u slučaju snopa) i u izolatorskim lancima je najbitnija veličina za naprezanje. Za tu svrhu se koriste specijalni uređaji, kao na slici 1, koji se ugrađuju u vodič ili u izolatorski lanac. Mjerni most je ugrađen u uređaj. Kompletna mjerna oprema je smještena u transportnu kutiju u izvedbi Faradayeva kaveza gdje su osjetljivi mikroprocesorski dijelovi uređaja zaštićeni od elektromagnetskih smetnji.



**Slika 1** Uređaj za mjerenje zatezanja užetnih vodiča i izolatorskih lanaca [6]

Mjerenje otklona je također vrlo bitno, a posebno u slučaju užetnih vodiča. Otkloni se mogu mjeriti pomoću različitih uređaja:

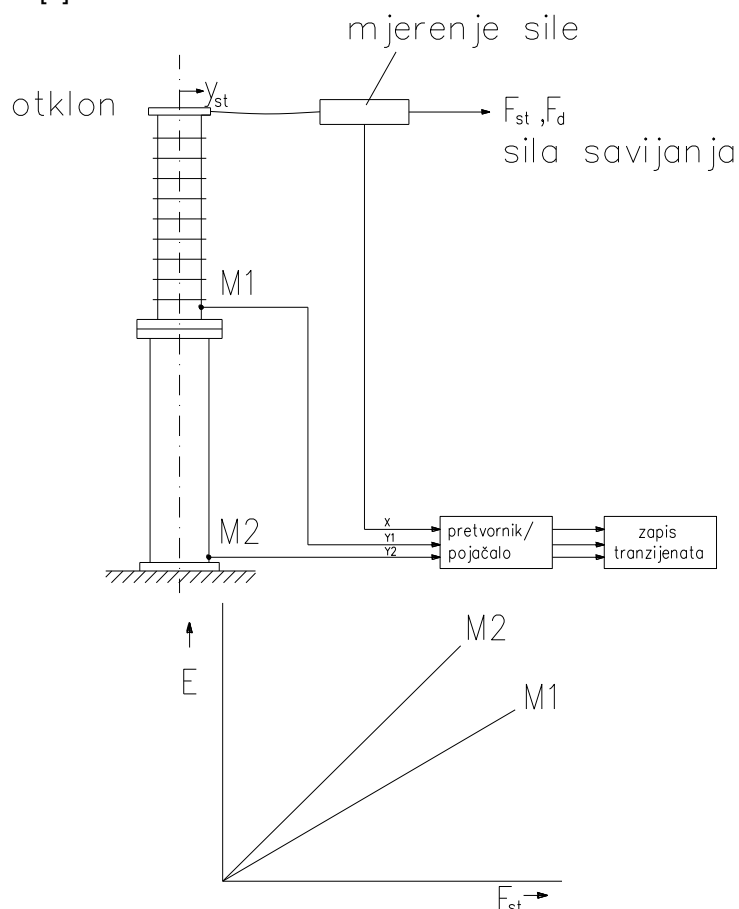
- elektrooptički pretvornici za mjerenje otklona;
- ultrazvučni senzori za mjerenje pozicije,
- električni pretvornici za mjerenje otklona,
- akcelerometri ugrađeni u cijevne vodiče,
- vrlo brze videokamere što omogućuje snimanje pojave dodira vodiča u snopu.

Temperature se mjere pomoću termometra s optičkim vlaknima.

### 3.2. Mjerne točke i kalibracije

Mjerni pretvornici i mjerni osjetnici za istežanje ili tenzometri mostne izvedbe montiraju se na vodiče i komponente na mjesta gdje se očekuju maksimalna naprežanja i/ili na mjesta gdje se naprežanja teško mogu izračunati.

Tvornički proizvedeni pretvornici normalno se kalibriraju u tvornici. Za mjerenje naprežanja materijala potrebno je izvršiti vrlo pažljivo kalibraciju mjernih osjetnika. Isto tako je potrebno vrlo pažljivo izvršiti kalibraciju uređaja za mjerenje sila (npr. sila zatezanja) ili promjena dimenzija materijala uslijed djelovanja sila (npr. sila savijanja). Pri tome je vrlo bitna linearnost i histereza uređaja za čitav mjerni opseg. Mjerni osjetnici mostnog tipa na potpornim izolatorima i nosivoj čeličnoj konstrukciji mogu se kalibrirati na način prikazan na slici 2 [7].

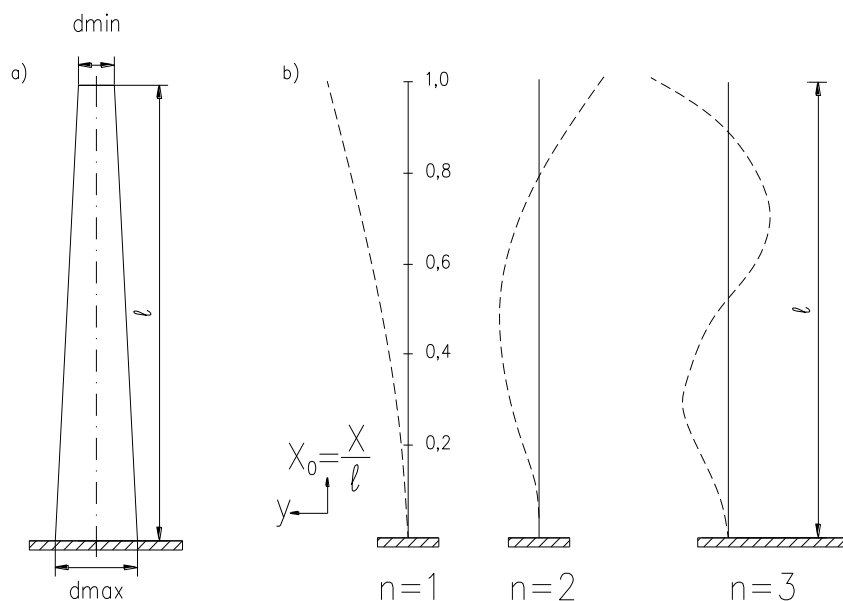


**Slika 2** Shematski prikaz kalibracije mjernih točaka na izolatoru ( $M_1$ ) i čeličnoj nosivoj konstrukciji ( $M_2$ ) prema [6]

Kako su potporni izolatori posebno osjetljive komponente sabirničkih sustava sa cijevnim sabirnicama ili kratkih spojnih vodova s užetnim vodičima, određivanje njihove čvrstoće i dinamičkog ponašanja je vrlo bitno. Rezultati nekih ispitivanja potpornih izolatora i njihove čvrstoće dana su u [7]. Iz statičke sile  $F_{st}$  sa slike 2 i otklona  $Y_{st}$ , može se odrediti statička krutost potpornih izolatora.

Mjerenje dinamičke sile  $F_d$ , koja se mijenja s frekvencijom, može pomoći kod određivanja vlastite mehaničke frekvencije sustava.

Statička i dinamička kalibracija potpornih izolatora, zasebno i zajedno s nosivom čeličnom nosivom konstrukcijom, potrebna je kako bi definirale mehaničke karakteristike kao što su krutost ( $E \cdot J$ ) i frekvencije. Točne vrijednosti ovih karakteristika potrebne su za proračun dinamičkih naprežanja i čvrstoće.



c)

$\frac{d_{min}}{d_{max}}$	n:	1	2	3	4	5
1,000		1,87510	4,69409	7,85476	10,99554	14,13717
0,950		1,83681	4,62351	7,74892	10,85177	13,95464
0,900		1,79751	4,55114	7,64037	10,70424	13,76731
0,850		1,75710	4,47681	7,52886	10,55265	13,57477
0,800		1,71548	4,40037	7,41413	10,39662	13,37656
0,750		1,67255	4,32159	7,29588	10,23573	13,17213
0,700		1,62814	4,24026	7,17375	10,06949	12,96086
0,650		1,58210	4,15608	7,04732	9,89731	12,74199

**Slika 4** Parametri vlastite frekvencije nosača s jednim upetim i jednim slobodnim krajem ( $\gamma_n$ ) i promjerima  $d_{min}$  i  $d_{max}$  na krajevima nosača

- a) Nosač (upet i slobodan kraj)  
 b) Neki oblici (modovi) oscilacija  
 c) Frekvencijski faktori  $\gamma_n$  ( $n = broj\ oblika\ vala$ )

Prema slici 4 iz statičkih mjerenja se može dobiti:

$$C = \frac{F_{st}}{Y_{st}} \quad (7)$$

Statički otklon nosača prema slici 4 može se izračunati iz formule:

$$Y_{st} = \frac{F_{st} \cdot \ell_i^3}{3 \cdot E \cdot J_0} \cdot \frac{1}{v} \quad (8)$$

Iz formula (7) i (8) može se dobiti:

$$E \cdot J_0 = \frac{c \cdot \ell_i^3}{3} \cdot \frac{1}{v} \quad (9)$$

Mehaničke harmoničke frekvencije nosača se općenito mogu izračunati iz formule:

$$f_n = \frac{\gamma_n^2}{2\pi \cdot \ell_i^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J_0}{m_i}} \quad (10)$$

pri čemu je moment inercije:

$$J_0 = \frac{\pi}{64} \cdot d_{max}^4 \quad (11)$$

$$m_i = \rho \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{max}^2 \quad (12)$$

$$m_i = \frac{M_i}{\ell_i} \cdot \frac{3}{v^2 + v + 1} \quad (13)$$

Zamjenom formula (9) i (13) u (10) dobije se:

$$f_n = \frac{\gamma_n^2}{2\pi} \cdot \frac{C}{M_i} \sqrt{\left(v + 1 + \frac{1}{v}\right)} \quad (14)$$

Pri tome su:

$\gamma_n$  – vrijednost frekvencijskog faktora za prvih 5 oblika titranja prema slici 4c;

$C$  – opružna konstanta prema formuli (7);

$M_i$  – ukupna masa izolatora u kg;

$$v = \frac{a_{min}}{a_{max}}$$

#### 4. Zaključak

Suvremeni programski alati omogućuju učinkovito rješavanje mehaničkih naprezanja uslijed djelovanja struje kratkog spoja kod postrojenja s užetnim sabirnicama. Bitno je analizirati kompletan sustav odnosno vodiče, izolatore i nosive konstrukcije. Prilikom izrade proračuna jedan od najbitnijih parametara je određivanje osnove vlastite frekvencije dijelova i potpunog sabirničkog sustava. Iznos vlastitih frekvencija utječe na titrajno ponašanje sustava kod vjetra malih brzina kada dolazi do pojave cikličke poremećajne sile, ali i kod udarnog opterećenja vjetra velikih brzina na mahove te kod udarnog opterećenja uslijed pojave kratkog spoja.

#### 5. LITERATURA

- [1] Bazjanec, D: Tehnička mehanika, Statika, Tehnička knjiga, Zagreb, 1974.
- [2] Alfrević, I.: Nauka o čvrstoći I, Tehnička knjiga, Zagreb, 1989.
- [3] Den Hartog, J. P.: Vibracije u mašinstvu, prijevod s engleskog, Građevinska knjiga, Beograd, 1972.
- [4] Muftić, O.: Mehanika 1, Tehnička knjiga, Zagreb, 1989.
- [5] Stegić, M.: Tehnička mehanika, Sveučilište u Zagrebu, ETF, Zagreb, 1992.
- [6] The mechanical effects of short circuit currents in open air substations, CIGRÉ WG02 (Effects of high currents) of SC 23 (Substations), Paris, 1987.
- [7] The mechanical effects of short circuit currents in open air substations (Rigid and Flexible Bus-Bars), CIGRÉ SC (Substations), Volume 1/Volume 2, 1996.
- [8] The mechanical effects of short circuit currents in open air substations (PART II), CIGRÉ WG 23.03. 2002.
- [9] IEC 60865-1: Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 2: Examples of calculation, 1994-06.
- [10] Ravlić V.: Cijevne sabirnice u visokonaponskim postrojenjima, Kigen/RAVEL, Zagreb, 2006.
- [11] IEC 60865-1: Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods, Geneva, 1993.
- [12] IEC 60865-2: Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 2: Examples of calculation, Geneva, 1994.