

Primljen / Received: 24.1.2014.

Ispravljen / Corrected: 6.3.2014.

Prihvaćen / Accepted: 31.3.2014.

Dostupno online / Available online: 10.6.2014.

Modeliranje kosog mostovskog kabela za pojedinačno zatezanje užadi

Autori:



Dr.sc. **Marija Spasojević-Šurdilović**, dipl.ing. građ.
Sveučilište u Nišu
Građevinsko-arhitektonski fakultet
marija.spasojevic.surdilovic@gaf.ni.ac.rs



Dr.sc. **Ana Spasojević**, dipl.ing. građ.
Structural engineering company INGENI SA
Genève
University of Applied Sciences and Arts
Western Switzerland
ana.spasojevic@ingeni.ch



Prof.dr.sc. **Dragoslav Stojić**, dipl.ing. građ.
Sveučilište u Nišu
Građevinsko-arhitektonski fakultet
dragoslav.stojic@gaf.ni.ac.rs

Stručni rad

Marija Spasojević-Šurdilović, Ana Spasojević, Dragoslav Stojić

Modeliranje kosog mostovskog kabela za pojedinačno zatezanje užadi

U radu su, na osnovi predloženog matematičkog modela kosog mostovskog kabela, izvedeni analitički izrazi za određivanje potrebne sile zatezanja u užadima i odgovarajuće deformacije kabela pri postupku višecikličnog zatezanja. Za ovaj postupak koriste se lake hidraulične preše (eng. monostrand jacks), pri čemu se u svakom ciklusu užad zateže pojedinačno silom istog intenziteta. Broj ciklusa zavisi od geometrijskih i mehaničkih karakteristika kabela, od intenziteta konačne sile zatezanja, kao i pomaka točaka oslonaca kabela. Efikasnost predloženog analitičkog postupka prikazana je na numeričkom primjeru.

Ključne riječi:

kosí kabal, uže, ciklično zatezanje, sila zatezanja, deformacija kabela, laka hidraulična preša

Professional paper

Marija Spasojević-Šurdilović, Ana Spasojević, Dragoslav Stojić

Modelling of a bridge stay cable for individual strand tensioning

Analytical expressions for determining the required tensioning force in strands, and the corresponding deformation of cables during the multi-cycle tensioning process, are derived in the paper based on the proposed mathematical model of a bridge stay cable. Monostrand jacks are used in this procedure and, at that, strands are tensioned in each cycle by individual application of force of the same intensity. The number of cycles depends on geometrical and mechanical properties of the cable, on the final tensioning force intensity, and on the moveability of the cable support points. The efficiency of the proposed analytical procedure is illustrated by a numerical example.

Key words:

stay cable, strand, cyclic tensioning, tensioning force, cable deformation, monostrand jack

Fachbericht

Marija Spasojević-Šurdilović, Ana Spasojević, Dragoslav Stojić

Modellierung von Brücken-Schrägseilen zur Vorspannung von Einzelsträngen

Aufgrund des vorgeschlagenen mathematischen Modells einer Schrägseilbrücke, wird in dieser Arbeit der analytische Ausdruck für die Berechnung der erforderlichen Strangspannkraft und die entsprechende Kabelverformung im mehrzyklischen Vorspannungsvorgang abgeleitet. Monolitzenspannsysteme sind hierbei angewandt, und die Stränge sind in jedem Zyklus einzeln mit Kräften konstanter Intensität angespannt. Die Anzahl der Zyklen hängt von geometrischen und mechanischen Eigenschaften der Kabel, erzielten Spannkraften und Verschiebungen der Befestigungspunkte der Kabel ab. Die Wirksamkeit des vorgeschlagenen analytischen Verfahrens ist durch ein numerisches Beispiel veranschaulicht.

Schlüsselwörter:

Schrägseil, Strang, zyklische Vorspannung, Spannkraft, Kabelverformung, Monolitzenspannsystem

1. Uvod

Zatezanje kosog kabela pomoću hidrauličnih preša može se izvoditi na dva načina: da se istodobno zateže sva užadi ili da se to obavlja pojedinačnim zatezanjem. Za istodobno zatezanje svih užadi koriste se relativno teške hidraulične preše, što otežava postupak unosa sile u kabel. Suvremena tehnologija, međutim, omogućava koristiti izuzetno lake hidraulične preše (slika 1.), kad je riječ o postupku pojedinačnog zatezanja užadi kabela. Unos sile u kabel može se provoditi u ciklusima, pri čemu se u svakom ciklusu užad zateže pojedinačno silom istog intenziteta. Predviđena sila u kabelu (Z_k) i odgovarajuća deformacija, skraćivanje osi kabela (ξ_k), određuju se u proračunskom modelu mosta za određenu fazu izgradnje. Autori ovog rada prikazani su postupak višecikličnog zatezanja kabela razvili za potrebe izgradnje pješačkog mosta preko rijeke Nišave u Nišu (slika 2.), gdje je taj postupak i uspješno primijenjen [1, 2].

Drugi postupak zatezanja kabela pruža mogućnost da se pojedinačno zatezanje užadi provodi samo u jednom ciklusu. Poznat je kao postupak jednociklične *izotenzije*, a tehnološki je razvijen u pariškom Freyssinet institutu. Taj postupak podrazumijeva unos sila različitog intenziteta od prvog do zadnjeg užeta kabela, tako da se na kraju samo jednog ciklusa postiže ujednačavanje sila u svim užadima [3, 4].



Slika 1. Zatezanje kabela lakom hidrauličnom prešom (eng. *monostrand jack*)

Kad je riječ o materijalima za izradu kabela, kod mostova s kosim zategama najčešće se koristi visokovrijedni čelik niske relaksacije. Iako postoji kontinuirano poboljšanje mehaničkih karakteristika čelika, znatniji razvoj dogodio se kod složenih materijala kao što je užad od ugljičnih vlakana tako da se poboljšavaju fizikalne karakteristike užadi [5].



Slika 2. Pješački most preko rijeke Nišave u Nišu

Za postupak pojedinačnog zatezanja užadi u više ciklusa, kao osnovne potrebne podatke treba navesti:

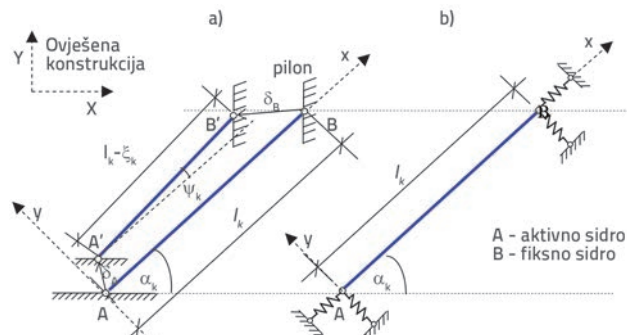
- koordinate točaka sidrenja kabela prije i nakon zatezanja,
- silu prije i nakon zatezanja,
- podatke o preši i sidrima,
- stranu zatezanja (zatezanje se obavlja s donje strane, slika 3.),
- podatke o užadi (broj, površina, masa, modul elastičnosti) i
- masu zaštitne cijevi i masu pomoćnog užeta za montažu.

Ovaj tehnološki postupak treba vrlo obazrivo primjenjivati. Razlog za to je da više puta ponovljeno uklinjavanje i rasklinjavanje može izazvati proklizavanje užadi, jer se u svakom sljedećem ciklusu izduženja užadi smanjuju, tako da pri višim ciklusima klin može doći na već zarezani dio užeta. U tom smislu, postupak jednociklične izotenzije ima neospornu prednost.

2. Analitički izrazi

2.1. Opće rješenje za pojedinačno zatezanje užadi

Promotrimo kosi kabel od n jednakih paralelnih užadi, izdvojenog iz konstrukcije mosta (slika 3.), koji ima sistemsku dužinu l_k , površinu poprečnog presjeka užeta A_u i modul elastičnosti E_u .



Slika 3. Kosi kabel: a) dispozicija kabela prije i nakon zatezanja; b) matematički model izdvojenog kabela

Predviđa se uvjet da je promjena pomaka sidrenih čvorova A i B (slika 3.a), odnosno skraćenje (ξ_k) dužine systemske osi linearna funkcija sile zatezanja Z_k kabla. Uz to se pretpostavlja da je zanemariva razlika dužine pravolinijske osi kabla (slika 3.) i realne, zakrivljene elastične osi, koja je u funkciji progiba, odnosno vlastite težine i nagiba kabla, kao i sile zatezanja Z_k [6]. Također se predviđa da je pri zatezanju kabla temperatura stalna.



Slika 4. Sidreni blok s aktivnim sidrom

Za utjecaj vlastite težine (g_k) kabla, nakon zatezanja silom Z_k preko aktivnog sidra A (slika 1 i slika 4), sile oslanjanja pri zatezanju na pravcu osi kabla, bit će:

$$Z_{A'} = Z_K \quad (1)$$

$$Z_{B'} = Z_K + g_k \cdot (l_k - \xi_k) \sin(\alpha_k + \psi_k) \quad (2)$$

Pri parcijalnom zatezanju kosog kabla, gdje se užad sukcesivno zateže, parcijalna sila u kabele ($\Delta Z_{k,j}$) iznosi

$$\Delta Z_{k,i} = Z_i - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta Z_{j,i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

gdje je:

Z_i - aplicirana sila zatezanja u i -tom užetu,

$\Delta Z_{j,i}$ - pad sile zatezanja u j -tom užetu uslijed parcijalnog skraćnja osi kabla poslije zatezanja i -tog užeta.

Pad sile u i -tom užetu uslijed uklinjavanja kompenzira se adekvatnim uvećanjem sile zatezanja, što zavisi od tipa sidrenja. Ukupna sila u kabele poslije zatezanja i -tog užeta iznosi

$$Z_{k,i} = \sum_{j=1}^i \Delta Z_{k,j} \quad (4)$$

Parcijalno skraćenje ($\Delta \xi_{k,i}$) osi kabla poslije zatezanja i -tog užeta je

$$\Delta \xi_{k,i} = K_0 \cdot \Delta Z_{k,i} \quad (5)$$

a ukupno skraćenje pri tome iznosi

$$\xi_{k,i} = \sum_{j=1}^i \Delta \xi_{k,j} = K_0 \cdot Z_{k,i} \quad (6)$$

gdje je:

$$K_0 = \frac{\xi_{k,i}}{Z_{k,i}} = \frac{\xi_k}{Z_k} \quad (7)$$

Pad sile zatezanja ($\Delta Z_{j,i}$) u prethodno zategnutim užadima, uslijed zatezanja i -tog užeta isti je za svako od tih ($i-1$) užadi i iznosi

$$\Delta Z_{j,i} = \frac{\Delta \xi_{k,i}}{l_{k,i}} \cdot E_u \cdot A_u \quad (8)$$

U relaciji (8) $l_{k,i}$ je dužina osi kabla prije zatezanja i -tog užeta i iznosi

$$l_{k,i} = l_k - \xi_{k,i-1} = l_k - K_0 \cdot Z_{k,i-1} \quad (9)$$

što se određuje počevši od prvog užeta, pri čemu je za $i = 1$, $l_{k,1} = l_k$, za $i = 2$, $l_{k,2} = l_k - K_0 Z_{k,1}$, itd.

Uvođenjem (8) u (3) i uvođenjem u (4), parcijalno skraćenje osi kabla poslije zatezanja i -tog užeta može se predstaviti relacijom

$$\Delta \xi_{k,i} = \frac{K_0 \cdot Z_i}{1 + (i-1)\eta_i} \quad (10)$$

gdje je:

$$\eta_i = \frac{K_0 \cdot E_u \cdot A_u}{l_{k,i}} \quad (11)$$

Uvođenjem (10) u (8) slijedi da je

$$\Delta Z_{j,i} = \frac{Z_i \cdot \eta_j}{1 + (i-1) \cdot \eta_j} \quad (12)$$

Uvođenjem (12) u (3), parcijalna sila u kabele poslije zatezanja i -tog užeta može se izraziti relacijom

$$\Delta Z_{k,i} = \frac{Z_i}{1 + (i-1) \cdot \eta_i} \quad (13)$$

Ukupna sila u kabele nakon zatezanja i -tog užeta iznosi

$$Z_{k,i} = \sum_{j=1}^i \frac{Z_j}{1 + (j-1) \cdot \eta_j} \quad (14)$$

Izduljenje i -tog užeta poslije njegovog zatezanja i sidrenja iznosi

$$\Delta l_i = \frac{Z_i (l_k - \xi_{k,i})}{E_u A_u} + \Delta \xi_{k,i} \quad (15)$$

2.2. Pojedinačno zatezanje užadi u više ciklusa

Zatezanje kosog kabela, predviđenom silom Z_k , sastavljenog od n jednakih paralelnih užadi, može se provoditi pojedinačnim zatezanjem užadi u ciklusima. Sila Z_k i odgovarajuća deformacija ξ_k (skraćenje osi kabela) određuju se u proračunskom modelu mosta za određenu fazu izgradnje. Aplikirana sila u svakom užetu (i) koje se zateže ista je u svakom ciklusu i iznosi

$$Z_i = \frac{Z_k}{n} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (16)$$

2.2.1. Prvi ciklus zatezanja užadi

U prvom, odnosno svakom sljedećem ciklusu, užad se zateže pojedinačno silom istog intenziteta. Nakon završetka prvog ciklusa, sile u užadima $Z_i^{(1)}$ su neujednačene, tako da je

$$Z_i^{(1)} > Z_{i-1}^{(1)}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

Sila u zadnjem zategnutom užetu $Z_n^{(1)}$ nema gubitaka, tako da je

$$Z_n^{(1)} = \frac{Z_k}{n} \quad (18)$$

Parcijalno skraćenje ($\delta\xi_i^{(1)}$) i -tog užeta uslijed zatezanja užadi ($i+1$) do n , poslije prvog ciklusa, iznosi

$$\delta\xi_i^{(1)} = \xi_{k,n}^{(1)} - \xi_{k,i}^{(1)} \quad (19)$$

Pad ($\delta Z_i^{(1)}$) aplikirane sile Z_i u i -tom užetu, nakon završetka prvog ciklusa iznosi

$$\delta Z_i^{(1)} = \frac{\delta\xi_i^{(1)}}{I_k - \xi_{k,i}^{(1)}} \cdot E_u \cdot A_u \quad (20)$$

Pri tome umanjena sila zatezanja i -tog užeta iznosi

$$Z_i^{(1)} = Z_i - \delta Z_i^{(1)} \quad (21)$$

U izrazima (19) i (20), za $\xi_{k,i}^{(1)}$ vrijedi relacija (6).

2.2.2. Viši ciklusi zatezanja užadi

Ako sa c obilježimo broj ciklusa, tada se za drugi, treći i više cikluse ($c \geq 2$) mogu relacije za sile i deformacije kabela izraziti na osnovi odgovarajućih relacija izvedenih u poglavljima 2.1. i 2.2.1.

Parcijalno skraćenje kabela poslije zatezanja i -tog užeta, sukladno relaciji (10), iznosi

$$\Delta\xi_{k,i}^{(c)} = \frac{K_0 \cdot \delta Z_i^{(c-1)}}{1 + (i-1)\eta_i} \quad (22)$$

gdje je:

$$\eta_i = \frac{K_0 \cdot E_u \cdot A_u}{I_k - \xi_{k,i-1}^{(c)}} \quad (23)$$

Ukupno skraćenje kabela u c -tom ciklusu, poslije zatezanja i -tog užeta, iznosi

$$\xi_{k,i}^{(c)} = \xi_{k,n}^{(c-1)} + \sum_{j=1}^i \Delta\xi_{k,j}^{(c)} = \xi_{k,i-1}^{(c)} + \Delta\xi_{k,i}^{(c)} \quad (24)$$

Parcijalno skraćenje ($\delta\xi_i^{(c)}$) i -tog užeta uslijed zatezanja užadi ($i+1$) do n , poslije c -tog ciklusa, iznosi

$$\delta\xi_i^{(c)} = \xi_{k,n}^{(c)} - \xi_{k,i}^{(c)} \quad (25)$$

Pad ($\delta Z_i^{(c)}$) aplikirane sile Z_i u i -tom užetu, nakon završetka c -tog ciklusa, iznosi

$$\delta Z_i^{(c)} = \frac{\delta\xi_i^{(c)}}{I_k - \xi_{k,i}^{(c)}} \cdot E_u \cdot A_u \quad (26)$$

Pri tome umanjena sila zatezanja i -tog užeta iznosi

$$Z_i^{(c)} = Z_i - \delta Z_i^{(c)} \quad (27)$$

Faktor realizacije zatezanja u c -tom ciklusu ($\gamma^{(c)}$) mora biti isti za deformacije i sile kabela, prema relaciji

$$\gamma^{(c)} = \gamma_\xi^{(c)} = \gamma_z^{(c)} \quad (28)$$

U (28) $\gamma_\xi^{(c)}$ je faktor realizacije skraćenja osi kabela prema

$$\gamma_\xi^{(c)} = \frac{\xi_{k,n}^{(c)}}{\xi_k} \quad (29)$$

a $\gamma_z^{(c)}$ je faktor realizacije unesene sile u kabel prema

$$\gamma_z^{(c)} = \frac{Z_{k,n}^{(c)}}{Z_k} \quad (30)$$

Relacija (28) izražava uvjet kompatibilnosti naprezanja i deformacija kabela nakon završenog zatezanja u c -tom ciklusu.

3. Numerički primjer

Numerički primjer služi kao objašnjenje, uz pretpostavku da su podaci (prema slici 3.): $l_k = 60$ m, $\alpha_k = 60^\circ$, $\psi_k = 2^\circ$, $x_k = 6$ cm, i ne odnosi se na konkretan most. Potrebni podaci se izračunavaju na osnovi koordinata krajeva, odnosno točaka oslonaca kabela prije i nakon zatezanja užadi, a prema globalnom koordinatnom sustavu usvojenog računskog modela mosta. Prije zatezanja, sukladno izrazima (1) i (2), sila zatezanja u kabelu kod aktivnog sidra jednaka je nuli, a kod fiksne na pilonu, zbog težine kabela iznosi 9,35 kN. Poslije završenog zatezanja projektiranom silom $Z_k = 1200$ kN, sila zatezanja u kabelu kod aktivnog sidra je 1200 kN, a kod fiksne 1209,53 kN. U ovoj fazi kabel se pridržava pomoćnim užetom ili drugim privremenim osloncima (npr. skelama).

Sila na preši se razlikuje od sile zatezanja užeta ispod aktivnog sidra za gubitak koji nastaje uslijed uvlačenja klina prilikom zaklinjavanja. Za analizirani kabel, pri uvlačenju klina

prosječne računске vrijednosti 7 mm, dopunska sila kojom se, kao početna na preši, uvećava projektna sila u užetu, iznosi 3,5 % od $Z_u = 100$ kN.

Za takav kabl usvojene su sidra i užad s karakteristikama za kabele "SPB SUPER sistem za prednaprezanje" (razvijen u Institutu IMS, Beograd), koji se primjenjuju prilikom gradnje pješačkog mosta preko rijeke Nišave u Nišu (slika 2.).

Kabel koji se ovdje razmatra sastoji se od 12 paralelnih sedmožilnih užadi (eng. 7-Wire strands) nominalnog promjera 16 mm. Sidrenje kraja kabla izvedeno je sidrima tipa S 12/16 (normalna i fiksna). Sidrenje kabla u glavi pilona izvedeno je fiksnim sidrom, a sidrenje kabla u kolničku konstrukciju mosta upotrebom aktivnog sidra preko kojeg se izvodi pojedinačno zatezanje užadi. Materijal za kosi kabl je užad tipa EN10138-3-Y1860 S7-16, niske relaksacije (klasa 2), tvornički zaštićena mašču i oblogom od tvrdog polietilena visoke gustoće (Sheathed strands).

Značajke su navedene užadi sljedeće:

- promjer (čelik) 15,7 mm,
- ukupan promjer (čelik + mast + PEHD) 19,1 mm,
- površina (čelik) $A_u = 150$ mm²,
- masa užeta (čelik + mast + PEHD) 1,29 kg/m,
- razred relaksacije - opuštanja: 2 (niska relaksacija < 2,5 %),

- karakteristična vlačna čvrstoća $f_{pk} = 1860$ N/mm²
- karakteristična vlačna sila $F_{pk} = A_u \cdot f_{pk} = 279$ kN,
- karakteristična sila pri kojoj nastaje trajno izduženje od 0,1 % je $F_{p,0,1} = 246$ kN,
- dopuštena sila u užetu (prema Eurocodu 2) $0,45 \cdot F_{pk} = 125,55$ kN,
- modul elastičnosti $E = 1,94 \cdot 10^5$ MPa.

Kabel 12Ø15,7 mm nalazi se u cijevi od polietilena visoke gustoće (PEHD), a ima sljedeće karakteristike:

- vanjski promjer d 110 mm ($\Delta d = +1,0$ mm),
- debljinu stjenke 6,6 mm ($\Delta s = +0,9$ mm),
- masu PEHD cijevi 2,166 kg/m'.

Osnovna masa kabla koji se ugrađuje (užad + zaštitna polietilenska cijev) iznosi $12 \times 1,29 + 2,166 = 17,65$ kg/m. Uzimajući u obzir i ostale elemente kabla (sidra, "kape", raspoređivače, devijatore, prigušivače, čeličnu cijev protiv vandalizma, polietilenske i čelične ograničivače i sl.), prosječna je masa kabla oko 19 kg/m.

Na osnovi izvedenih analitičkih izraza u poglavlju 2, izračunane su sile u užadima, odnosno kabele, kao i deformacije kabla za opciju pojedinačnog zatezanja užadi u više ciklusa, a rezultati proračuna prikazani su u tablicama 1 i 2.

Tablica 1. Prvi i drugi ciklus pojedinačnog zatezanja užadi

Uže [i]	Z_i [kN]	Prvi ciklus zatezanja				Drugi ciklus zatezanja			
		$\Delta \xi_{k,j}^{(1)}$ [cm]	$\xi_{k,j}^{(1)}$ [cm]	$Z_{k,j}^{(1)}$ [kN]	$Z_i^{(1)}$ [kN]	$\Delta \xi_{k,j}^{(2)}$ [cm]	$\xi_{k,j}^{(2)}$ [cm]	$Z_{k,j}^{(2)}$ [kN]	$Z_i^{(2)}$ [kN]
1	100	0,500	0,500	100,00	76,50	0,117	5,437	1087,46	97,49
2	100	0,488	0,988	197,62	78,88	0,103	5,540	1108,08	97,99
3	100	0,477	1,465	292,97	81,20	0,090	5,630	1126,00	98,43
4	100	0,466	1,931	386,16	83,47	0,077	5,707	1141,40	98,80
5	100	0,456	2,386	477,27	85,69	0,065	5,772	1154,43	99,12
6	100	0,446	2,832	566,40	87,87	0,054	5,826	1165,25	99,39
7	100	0,436	3,268	653,64	89,99	0,044	5,870	1173,98	99,60
8	100	0,427	3,695	739,06	92,08	0,034	5,904	1180,75	99,76
9	100	0,418	4,114	822,73	94,12	0,025	5,928	1185,67	99,88
10	100	0,410	4,524	904,73	96,12	0,016	5,944	1188,85	99,96
11	100	0,402	4,926	985,12	98,08	0,008	5,952	1190,40	100,00
12	100	0,394	5,320	1063,96	100,00	0,000	5,952	1190,40	100,00
		$\gamma^{(1)} = 88,66\%$				$\gamma^{(2)} = 99,20\%$			

Tablica 2. Treći i četvrti ciklus pojedinačnog zatezanja užadi

Uže [i]	Z_i [kN]	Treći ciklus zatezanja				Četvrti ciklus zatezanja			
		$\Delta\xi_{kj}^{(3)}$ [cm]	$\xi_{kj}^{(3)}$ [cm]	$Z_{kj}^{(3)}$ [kN]	$Z_i^{(3)}$ [kN]	$\Delta\xi_{kj}^{(4)}$ [cm]	$\xi_{kj}^{(4)}$ [cm]	$Z_{kj}^{(4)}$ [kN]	$Z_i^{(4)}$ [kN]
1	100	0,013	5,965	1192,91	99,84	0,001	5,998	1199,67	99,99
2	100	0,010	5,974	1194,87	99,89	0,001	5,999	1199,78	100,00
3	100	0,007	5,982	1196,37	99,92	0,000	5,999	1199,85	100,00
4	100	0,006	5,987	1197,48	99,95	0,000	5,999	1199,90	100,00
5	100	0,004	5,991	1198,28	99,97	0,000	6,000	1199,93	100,00
6	100	0,003	5,994	1198,83	99,98	0,000	6,000	1199,94	100,00
7	100	0,002	5,996	1199,18	99,99	0,000	6,000	1199,95	100,00
8	100	0,001	5,997	1199,38	100,00	0,000	6,000	1199,95	100,00
9	100	0,000	5,997	1199,48	100,00	0,000	6,000	1199,95	100,00
10	100	0,000	5,998	1199,51	100,00	0,000	6,000	1199,95	100,00
11	100	0,000	5,998	1199,51	100,00	0,000	6,000	1199,95	100,00
12	100	0,000	5,998	1199,51	100,00	0,000	6,000	1199,95	100,00
$\gamma^{(3)} = 99,96 \%$					$\gamma^{(4)} = 100 \%$				

Poslije četvrtog ciklusa, izduženja svih užadi su jednaka i prema (15) iznose po 20,5 cm. Pri tome, maksimalni progib zategnutog kabela [6] iznosi

$$\max u_k = \frac{(l_k - \xi_k)^2}{8 \times Z_k} \times g_k \times \cos(\alpha_k + \psi_k) = 3,2 \text{ cm} \quad (31)$$

4. Zaključak

Suvremena tehnologija omogućuje da se izuzetno lake hidraulične preše koriste pri pojedinačnom zatezanju užadi kabela. Unos sile u kabel može se provesti u više ciklusa, pri čemu se u svakom ciklusu užad zateže istom silom. Broj

ciklusa zavisi od geometrijskih i mehaničkih karakteristika kabela, od intenziteta konačne sile zatezanja te od pomaka točaka oslonaca (ankera) kabela. Na osnovi izloženih rješenja jednostavno je odrediti potreban broj ciklusa zatezanja, kao i ostvarene sile u užadi i odgovarajuće deformacije (skraćenje osi) kabela za svaki ciklus. S obzirom na to navedena rješenja pogodna su za kontrolu primjene tehnološkog postupka višecikličnog zatezanja kabela pomoću lakih hidrauličnih preša, ako izvođač ne posjeduje opremu potrebnu za tehnološki postupak jednocikličnog zatezanja, odnosno izotenzije [3]. To se odnosilo i na slučaj pri izgradnji pješačkog mosta preko rijeke Nišave u Nišu, gdje je izloženi postupak i uspješno primijenjen.

LITERATURA

- [1] Spasojević-Šurdilović, M.: Modeliranje i analiza stanja napona i deformacija mostova sa kosim zategama pri faznom formiranju sistema pomoću privremenih oslonaca, magistarski rad, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu, Srbija, 2007.
- [2] Spasojević-Šurdilović, M., Spasojević A., Spasojević, N.: Specifična problematika projektovanja i izvođenja pešačkog mosta preko reke Nišave u Nišu, Treći internacionalni naučno-stručni skup, GNP 2010, Žabljak, Crna Gora, knjiga 1, pp. 643-648, 2010.
- [3] Spasojević-Šurdilović, M., Spasojević, A.: Analytical solutions for determining tension force in strands of bridge stay-cable in isotension procedure, The International Conference Innovation as a Function of Engineering Development-IDE 2011, Faculty of Civil Engineering and Architecture, University of Nis, pp. 319-324, 2011.
- [4] Spasojević-Šurdilović, M., Spasojević, A., Prolović, V., Bonić, Z., Davidović, N.: Determination of tension forces in bridge stay cable during successive strand stressing, Treći internacionalni naučno-stručni skup, GNP 2012 - 4th International Conference Civil Engineering - Science and Practice, Žabljak, Crna Gora, pp. 321-328, 2012.
- [5] Radić, J., Kindilj, A., Mandić, A.: Proračun i oblikovanje ovješnih mostova na primjeru mosta Jarun, Građevinar 61 (2009) 9, pp. 837-851.
- [6] Spasojević-Šurdilović, M., Spasojević, A.: Analitička rešenja za deformacije kosih mostovskih kablova, Zbornik radova Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu, 25, pp. 207-214, 2010.