

АНАЛИЗА ОПТЕРЕЋЕЊА РЕШЕТКАСТОГ ДАЛЕКОВОДНОГ СТУБА ПРЕМА ЕВРОПСКИМ СТАНДАРДИМА

Дијана Мајсторовић¹
Мирослав Бешевић²
Александар Прокић³

УДК: 624.042.074.5

DOI: 10.14415/zbornikGFS30.03

Резиме: У раду се приказује анализа оптерећења далеководног носивог двосистемског стуба напонског нивоа 110kV према Европским Нормама. С обзиром на специфичност оптерећења које дјелује на далеководни носиви стуб велика труд се мора посветити анализи оптерећења и усвајању случајева оптерећења. Анализирана конструкција је решеткасти челични стуб висине 41,50m са три пара конзола. Након тога, приказује се и дискутује поређење резултата добијених према Европским Нормама са резултатима добијеним према Југословенским стандардима.

Кључне речи: решеткасти стуб, носиви далеководни стуб, Европски стандарди, Југословенски стандарди

1. УВОД

У раду се даје детаљан приказ прорачуна оптерећења на далеководни носиви двосистемски стуб напонског нивоа 110kV, са ознаком „2Д4“, према Европским Нормама (EN), [1, 2]. Затим, приказани су основни резултати прорачуна оптерећења за анализирани стуб.

Након тога, дато је поређење добијених резултата по Европским Нормама (EN) са резултатима добијеним по Југословенским стандардима (JUS) и Правилнику о техничким нормативим за изградњу надземних електроенергетских водова називног напона од 1 kV до 400 kV (Правилник), [3].

Далеководни стубови су конструкције које се пројектују као типске, па је и анализирани стуб такође типски стуб висине 41,50m који је по JUS-у рачунат за брзину вјетра од 25m/s, средњи распон до 350m и за гравитациони распон до 800m. Бројеви и слова у ознаци стуба представљају: 2...двоструки вод (ДВ), Д...напонски ниво 110kV, 4...оптерећење вјетром од 75daN/m², [4].

¹ Дијана Мајсторовић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет Бања Лука, е – mail: dmajstorovic@agfbl.org

² Проф. др Мирослав Бешевић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Новом Саду, Грађевински факултет Суботица, Козарачка 2а, е – mail: miroslav.besevic@gmail.com

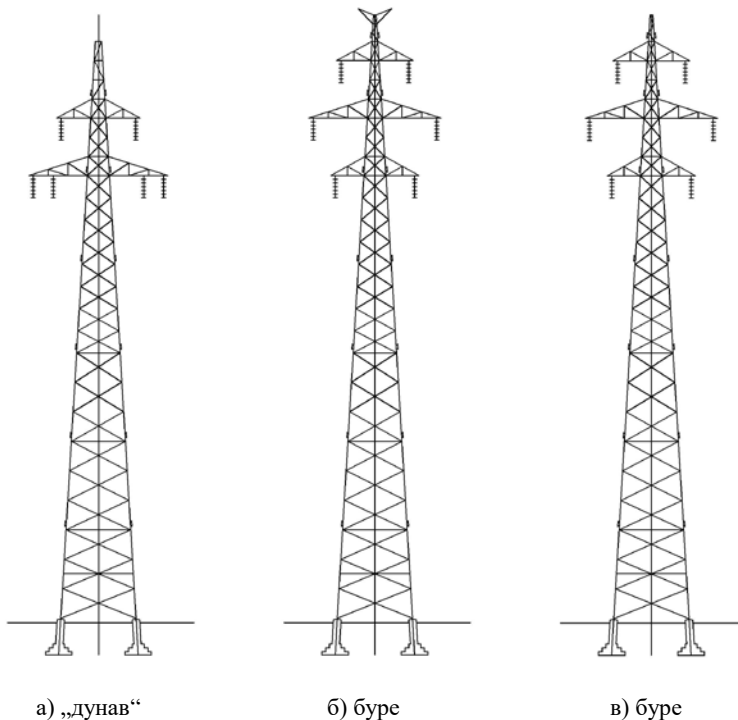
³ Проф. др Александар Прокић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Новом Саду, Грађевински факултет Суботица, Козарачка 2а, е-mail: aprokic@eunet.rs

С обзиром на специфичности оптерећења за решеткасте далеководне стубове према Европским Нормама велики простор у раду је посвећен самој анализи оптерећења и усвајању основних вриједности параметара и коефицијената за одређивање мјеравањих комбинација оптерећења. С обзиром на непостојање Националних анекса као додатака Еврокоду за Босну и Херцеговину кориштени су Национални анекси, прописи и препоруке за земаље Европе код којих су ови стандарди развијени, [5].

2. О ДАЛЕКОВОДНИМ СТУБОВИМА

Стубови као јадан од најзначајнијих дијелова далековода су рађени, а и данас се раде од различитих облика и различитих материјала као што су дрво, бетон, челик, алуминијум и сл. Развојем индустрије челика, побољшањем квалитета челика, повећањем асортимана челичних производа, развојем антикорозивне заштите поступком топлог цинчања који увелико продужава вијек трајања стубова, једноставна производња елемената стуба, као и једноставна уградња довели су до тога да се са сигурношћу може рећи да далеководни 110kV-ни стубови произведени од челика у економском смислу немају алтернативу.

Најчешћи облици стубова за 2 x 110kV водове су стубови типа „дунав“ и „буре“, слика 1.



Слика 1. Силуета основних облика стубова за ДВ 2 x 110 kV

У пракси се као оптимално рјешење за ДВ 110kV воде показује стуб типа буре са једним ужетом, који је анализиран и у овом раду. Распоред конзола овога типа стуба обезбјеђује симетрично оптерећење стуба и због мање дужине конзоле захтијева знатно мањи коридор од стуба типа „дунав“.

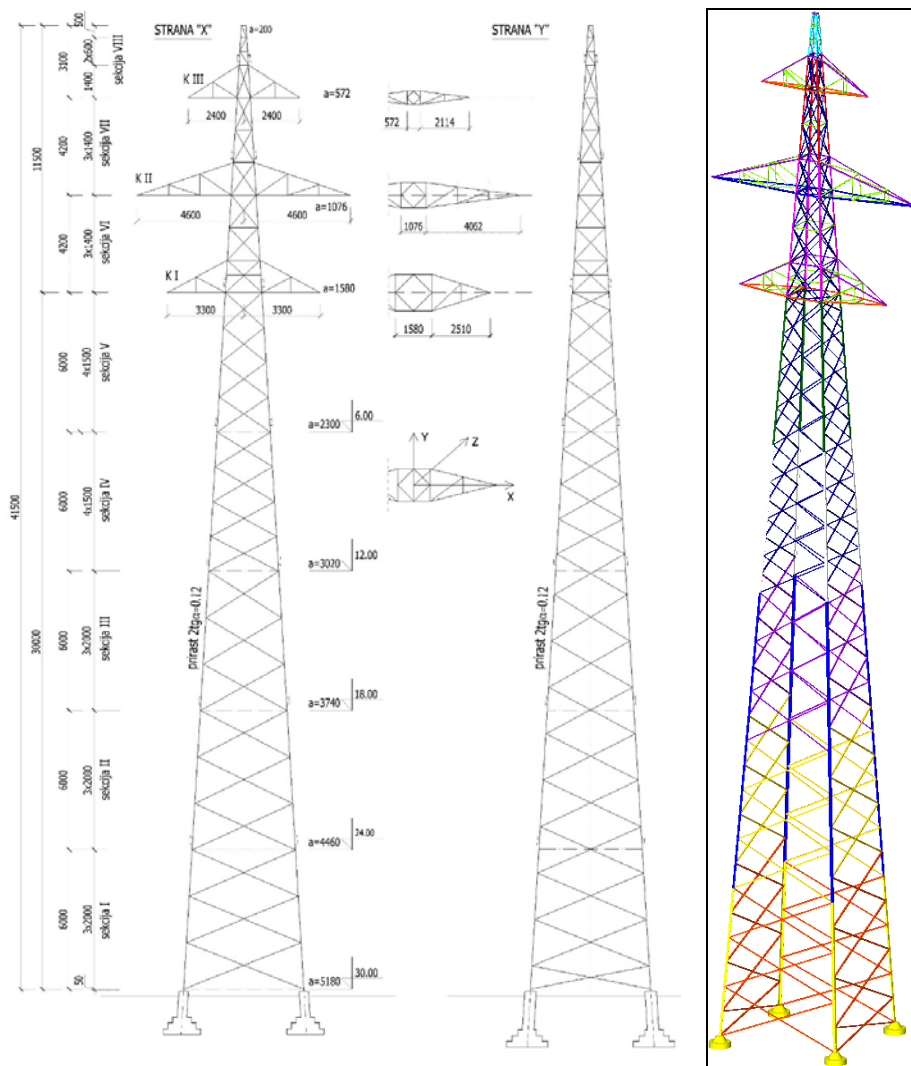
3. КАРАКТЕРИСТИКЕ НОСИВОГ „2Д4“ СТУБА

У Табели 1 дати су основни улазни подаци анализираних далеководних носивих стуба „2Д4“ као и карактеристике одабране опреме.

Табела 1: Улазни подаци за прорачун стуба и карактеристике одабране опреме

Ознака стуба	2Д4 носиви стуб
Називни напон	110 kV
ВОДИЧИ	243-AL1/39-ST1A
Називни пресјек	240/40
Рачунски пресјек	282.6 mm ²
Пречник	21.9 mm
Подужна маса ужета	0.98 kg/m
Напрезање водича σ	90 N/mm ²
Рачунска сила кидања	85.12 kN
Модул еластичности	77000 N/mm ²
OPGW	97-AL1/56-ST1A
Рачунски пресјек	152.8 mm ²
Пречник оптичког кабла	16 mm
Подужна маса оптичког кабла	0.707 kg/m
Напрезање заштитног ужета σ	140 N/mm ²
Рачунска сила кидања	77.85 kN
Модул еластичности	107000 N/mm ²
ИЗОЛАТОРСКИ ЛАНАЦ	U 120BS
Пречник изолационог дела	255mm
Уградбена висина	146 mm
Маса ланчане јединице	4.2 kg
Број изолатора у ланцу	2 x 8 = 16 ком
Средњи распон	350 m
Угао лома трасе	0°C
Гравитациони распон	800 m

На слици 2 приказана је статичка силуета стуба, као и модел стуба добијен у програмском пакету Tower, на којој се види распоред и димензије конструктивних елемената.



Слика 2. Силуета носивог стуба „2Д4” и изометрија стуба – модел из Tower-a

3.1. МАТЕРИЈАЛ ЗА КОНСТРУКЦИЈУ

За основни материјал изабрани су вруће ваљани челични једнокраки угаоници са заобљеним ивицама JUS C.B3.101 и челични лимови дебели JUS C.B4.100 од конструкционог челик класе Č.0361 (по EN-у: S235). Димензије конструктивних

елемената угаоника су L35x35x4 до L110x110x10. Номиналне вриједности границе развлачења f_y и граничне чврстоће на затезање f_u за номиналну дебљину елемента до 40mm, за челик S235, [6], износе:

$$f_y = 235 \text{ N / mm}^2$$

$$f_u = 360 \text{ N / mm}^2$$

Коефицијенти материјала који су кориштени у прорачуну имају следеће вредности, [6]: $E=210\,000\text{N/mm}^2$, $\nu=0.3$, $\alpha=12 \times 10^{-6} 1/\text{K}$ за $T < 100\text{ }^\circ\text{C}$.

4. ПРОРАЧУН ОПТЕРЕЂЕЊА ПРЕМА ЕВРОПСКИМ СТАНДАРДИМА

Анализа оптерећења далеководног решеткастог стуба рађена је према европском стандарду за надземне електричне водове изнад 45kV, [1, 2]. Приликом усвајања параметара конструкције и утицаја који делују на њу кориштени су прописи за земље из окружења (због непостојања Националних додатака за Босну и Херцеговину), [5, 7, 8].

4.1. ПРОРАЧУН ВЕТРА

Оптерећење ветром разматра се као квази-статички притисак који делује окомито на површину грађевине. За основну, тј. референтну, брзину ветра усвојена је брзина са којом је рачунат стуб према ЈУС-у:

$$V_{R(h)} = v_{b,0} = 25 \text{ m / s}$$

Брзина ветра V_h према EN функција је висине изнад површине тла, за разлику од ЈУС-а код кога се брзина ветра на стуб са висином не мења. V_h се рачуна према изразима:

$$\text{- висина до 10m : } V_h = V_R \quad (1)$$

$$\text{- висина изнад 10m : } V_h = \ln \frac{h}{z_0} / \ln \frac{10}{z_0} \cdot V_R = k_T \cdot \ln \frac{h}{z_0} \cdot V_{R(h)} \quad (2)$$

Фактор терена k_T и параметар храпавости тла z_0 зависе од категорије терена на којој се налази конструкција. У раду је усвојена категорија терена II, са следећим вредностима параметара, [9]:

$$k_T = 0.19, \quad z_0 = 0.05$$

- Динамички притисак ветра q_h :

$$q_h = \frac{1}{2} \rho \cdot V_h^2 \quad (3)$$

За густину ветра ρ према [7] усвојена је вредност 1.25 kg/m^3 .

Сила ветра на проводницима и стубу одређена је према препорукама датим у [1].

- **Сила ветра на проводницима:**

$$Q_{Wc} = q_h \cdot G_q \cdot G_c \cdot C_c \cdot d \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} \cdot \cos^2 \phi \quad (4)$$

Фактор одговора удара ветра G_q , као функција висине изнад тла, рачуна се према изразу:

$$G_q = k_g^2 = \left(1 + 2.28 \sqrt{\ln \frac{h}{z_0}} \right)^2 \quad (5)$$

У раду је усвојена вредност према препорукама датим у [8] која износи

$$G_q = 1.0$$

Вредност резонантног фактор проводника G_c зависи од средњег распона проводника и рачуна се према изразу:

$$G_c = 1.3 - 0.098 \ln(L) \quad (6)$$

Вредност фактора облика проводника C_c према препорука датим у [3] износи:

$$C_c = 1.0$$

За критичне правце ветра према EN обавезно се рачунају правци:

$$\phi = 0^\circ \text{ и } \phi = 45^\circ$$

- **Сила ветра на изолаторима:**

$$Q_{Wins} = q_h \cdot G_q \cdot G_{ins} \cdot C_{ins} \cdot A_{ins} \quad (7)$$

За вредност резонантног фактор изолаторског сета G_{ins} се препоручује да се по потреби усвоји вредност као за G_t .

Вриједност фактора облика изолаторског сета C_{ins} према препорука датим у [1] износи:

$$C_{ins} = 1.20$$

- **Сила ветра на стубу:**

$$Q_{Wt} = q_h \cdot G_q \cdot G_t \cdot (1 + 0.2 \cdot \sin^2 \phi) \cdot (C_{t1} \cdot A_{t1} \cdot \cos^2 \phi + C_{t2} \cdot A_{t2} \cdot \sin^2 \phi) \quad (8)$$

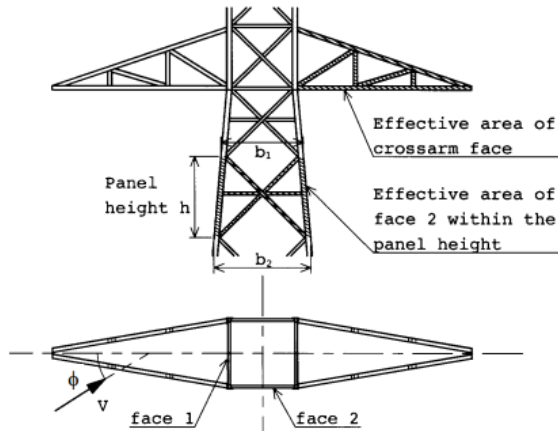
Вриједност резонантног фактора стуба G_t (као и вредност фактора G_{ins}) усвојена је према препорукама датим у [1], који за решеткасте стубове висине до 60m износи:

$$G_t = 1.05$$

- **Сила ветра на изолатору:**

$$Q_{WTC} = q_h \cdot G_q \cdot G_r \cdot C_{tc} \cdot A_{tc} \cdot (\sin \phi + 0.4 \cos \phi) \quad (9)$$

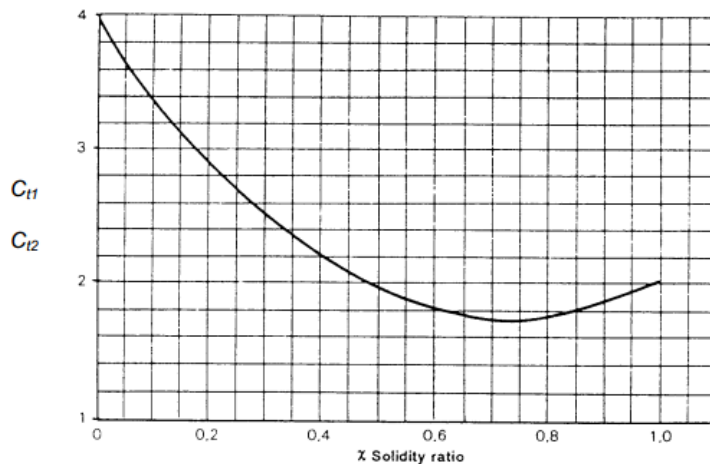
A_{t1} , A_{t2} и A_{tc} представљају ефективне површине елемената панела и конзоле, а рачунате су се према препорукама датим на слици 3 (преузето из [1]).



Слика 3. Ефективна површина панела стуба и конзоле

Фактор облика C_t је функција коефицијента испуњености χ , и одређен је помоћу графика датог на слици 4. Коефицијент испуњености χ рачуна се према формули:

$$\chi = A_t \frac{2}{h(b_1 + b_2)} \quad (10)$$



Слика 4. Фактор облика C_t за правоугаони стуб састављен од равних елемената

4.2. ОПТЕРЕЋЕЊЕ ОД ЛЕДА

Према EN оптерећење од леда се узима у обзир само само на проводницима док се утицај леда на самом стубу, тј. штаповима решетке, занемарује. С обзиром да се тип и дебљина леда дефинишу Националним анексима, због непостојања истих за БиХ у прорачуну је усвојен чисти лед чија са густином 9000N/m^3 и дебљина леда на проводнику од 10mm , према [2].

Оптерећење ледом рачуна се по формули:

$$Q_l = (D^2 - d^2) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 9000 \text{ [N / m]} \quad (11)$$

gdje је D пречник проводника са ледом, а d пречник проводника без леда.

4.2.1. КОМБИНАЦИЈА ВЕТРА И ЛЕДА

- **Силе ветра на стубу са залеђених проводника:**

$$Q_{wc} = 0.4 \cdot q_h \cdot G_q \cdot G_c \cdot C_{cl} \cdot D \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} \cdot \cos^2 \phi \quad (12)$$

Фактор облика залеђењог проводника C_{cl} усвојен је према табели 2, [1], и износи:

$$C_{cl} = 1.0$$

Табела 2. Коефицијент облика C_{cl} и густина ρ_l [kg/m^3] за разне типове леда

Ice type	Wet snow	Glaze ice	Soft rime ice	Hard rime ice
C_{cl}	1.0	1.0	1.2	1.1
ρ_l	500	900	300	700

4.3. БЕЗБЕДНОСНО ОПТЕРЕЋЕЊЕ - SECURITY LOADS

Безбедносно оптерећење у случају решеткастих челичних стубова се рачуна као дио силе затезања проводника, помоћу формуле:

$$A_k = \beta \cdot T_0 \quad (13)$$

При томе је A_k редукована сила затезања у проводнику, β је коефицијент редуције силе затезања а T_0 почетна сила затезања у проводнику. Вриједност коефицијента β је дефинисана у табели 6.

4.4. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ПРОРАЧУНА ОПТЕРЕЋЕЊА НА СТУБ

У наредним табелама приказани су резултати прорачуна оптерећења према EN.

Табела 3: Ветар на уже и изолаторе

Уже	дио главе	h	W _c (0°)	W _c (45°)	W _{INS} (0°)	W _{C+W_{INS}}	W _{C+W_{INS}}
		[m]	[kN]	[kN]	[kN]	0° [kN]	45° [kN]
Проводник	д. конз.	30	3.537	1.768	0.25	3.786	2.018
	с. конз.	34.2	3.683	1.841	0.26	3.943	2.101
	г. конз.	38.4	3.815	1.907	0.27	4.084	2.176
3. уже	врх стуба	41.5	2.866	1.433	-	2.866	1.433

Табела 4: Ветар на стуб

Дио стуба	Секције стуба	h	A _t	q _н	W _T (0°)	W _{T^{X,Y}} (45°)
		[m]	[m ²]	[N/m ²]	[kN]	[kN]
ТРУП	I	3	3.352	382.8	4.438	3.766
	II	9	2.708	382.8	3.588	3.045
	III	15	2.381	449.6	3.665	3.11
	IV	21	2.182	504.2	3.66	3.106
	V	27	1.875	547	3.305	2.805
ГЛАВА	VI	32.8	1.806	581.4	2.937	2.492
	VII	37.7	1.033	606.6	1.505	1.277
	VIII	40.65	0.266	620.5	0.344	0.292
КОНЗОЛЕ	K I	30.7	0.382	569.6	0.258	0.452
	K II	34.9	0.66	592.6	0.454	0.795
	K III	39.1	0.334	613.3	0.24	0.42

Табела 5: Ветар на уже са ледом и тежина ужади са ледом

Уже	дио главе	d	D	g _{ice}	W _{ZC - ice}	W _{C+W_{INS}}	W _{C+W_{INS}}
		[m]	[m]	[N/m']	[kN]	0° [kN]	45° [kN]
Проводник	д. конз.	0.0218	0.0418	8.991	15.87	3.07	1.72
	с. конз.					3.2	1.79
	г. конз.					3.31	1.85
3. уже	врх стуба	0.016	0.036	7.351	11.32	2.58	1.29

За анализу утицаја у стубу усвојене су комбинације оптерећења и парцијални коефицијенти сигурности γ дати у табелама 6 и 7 према [8], а који су урађени по препорукама датим у [1].

Табела 6. Комбинације оптерећења према ЕН

Normal Working Load Cases	
N1, N2	• Deadweights, Wind on tower, accessories and conductors
N3, N4	• Deadweights, Ice loads, Reduced wind on tower, accessories and iced conductors
N5	
Exceptional Loading Cases	
E1 Broken Wires	• Deadweights, Ice loads, one sided reduction of conductor or earthwire tension (both under wind and ice load condition) by 50% for phase conductor and 65% for earthwire acting at any one attachment point
E2 Cascading	• Deadweights, Ice loads, one sided reduction of conductor or earthwire tension (both under wind and ice load condition) by 20% for phase conductor and 40% for earthwire acting at attachment points simultaneously
E3 Erection and Maintenance	• Deadweights, Erection and maintenance loads • a) No wind • b) 50% of max. wind on tower, accessories conductors, without man-load

Табела 7. Парцијални коефицијенти сигурности γ

Load Cases			Load factor
N1 ... N5	Wind	$\gamma_{W,N}$	1.35
	Ice	$\gamma_{I,N}$	1.35
	Conductor tension	$\gamma_{C,N}$	1.35
	Deadweight	γ_G	1.1 / 1.0 ¹⁾
E1, E2	Wind	$\gamma_{W,E}$	1
	Ice	$\gamma_{I,E}$	1
	Conductor tension	$\gamma_{C,E}$	1
	Deadweight	γ_G	1.1 / 1.0 ¹⁾
E3	Deadweight	γ_G	1.1 / 1.0 ¹⁾
	All variable loads	γ_P	1.5

¹⁾ $\gamma_G=1.0$ for uplift conditions

Добијени број комбинација је 4 за нормално радно оптерећење и 15 за изузетно оптерећење, док је према ЈУС-у број комбинација 7 од којих је 3 за нормално радно

оптерећење и 4 за изузетно оптерећење. С обзиром на ограничен простор, у раду је приказан дио резултата прорачуна према EN-у, док се у наредном поглављу даје поређење добијених резултата са резултатима према Правилнику и JUS-у.

5. ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА ДОБИЈЕНИХ ПРЕМА ДВА СТАНДАРДА

Анализирајући резултате добијене према два стандарда који се односе на анализу оптерећења према Европским Нормама (EN) и према Правилнику уочава се следеће:

- *сопстена тежина* од проводника је већа према EN за 7.2%
- *оптерећење ветра* на стуб је веће према Правилнику у односу на оптерећење добијено према EN чак и за 32% (на профилу L110x110x10)
- *оптерећење ветра у x-правцу* на проводнике је веће према EN, за заштитно уже разлика је чак 24.6%
- *оптерећење ветром под 45°* се не разматра према Правилнику, док је према EN обавезно, тако да се тај утицај не може поредити
- *оптерећење леда* се узима да делује само на проводницима и при томе се према EN комбинује са ветром, док се према Правилнику утицај леда и ветра не комбинују
- *оптерећење леда* на проводник је веће према JUS-у него што је усвојено оптерећење према EN (како не постоје Национални анекси за Босну и Херцеговину оптерећење ледом је усвојено на основу препорука за земље из окружења)
- *сила кидања водича* је према оба стандарда једнака, али се према EN овај утицај коминује са деловањем вјетра у оба правца и леда, док се према Правилнику овај утицај комбинује само са дејством леда
- *сила кидања заштитног ужета* је већа према препорукама датим у EN, и такође се комбинује са утицајем ветра и леда
- *каскадно оптерећење* је утицај који се анализира према EN у комбинацији са ветром и ледом, док се овај утицај не анализира према Правилнику
- *оптерећење од тежине човјека* на конзолама на мјесту качења проводника у комбинацији са вјетром анализира се само према EN

6. ЗАКЉУЧАК

Анализа оптерећења према Европским Нормама рађена је независно од анализе оптерећења која је добијена према Правилнику (док је из JUS-а је усвојена само основна брзина вјетра). Након спроведене анализе и поређења добијених резултата према два стандарда уочена је значајна разлика у добијеном оптерећењу, тачније уочено је да је оптерећење према Европским Нормама веће у односу на оптерећење добијено према Југословенским стандардима. Разлог за ово су строжији критеријуми првенствено у комбинацијама оптерећења, које се разликују према EN и према Правилнику. С обзиром да носиви далеководни стубови типа „2Д4“ пројектовани и изведенођени прије неколико деценија и даље подносе и преносе

оптерећења, може се закључити да су утицаји који су добијен у овом раду према Европским Нормама већи од реалних.

Добијене разлике у оптерећењу ће свакако изазвати и значајне разлике у статичким утицајима на конструкцији, што ће бити предмет анализе у следећем раду.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] EN 50341-1: Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV, Part 1: General requirements - Common specifications. Bruxelles, CELENEC, **2001**.
- [2] Kiessling, F., Nefzeger, P., Nolasco, J.F., Kaintzyk, U.: Overhead Power Lines Planing Design Construction, Springer, **2002**.
- [3] Pravilnik o tehničkim normativim za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV, Službeni glasnik RS, broj 7/**2012**.
- [4] JUS U.C7.110: Opterećenje ветром, Jugoslovenski standard, Savezni zavod za standardizaciju, **1991**.
- [5] PN-EN 50341-3:2002/AC: Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV, Część 3: Zbiór normatywnych warunków krajowych, Lipiec, **2006**.
- [6] EN 1993-1-1:1992: Eurocode 3 – Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Incorporating Corrigenda February 2006 and March **2009**.
- [7] HRN EN 1991-1-4:2012/NA: Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije - Dio 1-4: Opća djelovanja - Djelovanja vjetra - Nacionalni dodatak, Jun **2012**.
- [8] LOT2 Part B1: Particular Technical Requirements for 110 kV OHL, FICHTNER
- [9] EN 1991-1-4:2005+A1: Eurocode 1 – Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions, Incorporating Corrigenda January **2010**.

LOAD ANALYSIS OF TRANSMISSION LATTICE STEEL TOWER ACCORDING WITH THE EUROPEAN STANDARDS

***Summary:** The paper presents the load analysis of transmission suspension tower with a voltage of 110kV according with the European Standards. Considering the specificity of the loads acting on the overhead suspension tower great effort must be paid to the analysis of the loads and load cases adoption. The structure analysed is a lattice steel tower of height 41,50m with three pairs of crossarm. Thereafter, presents and discusses the comparison of the results obtained by European standards with the results obtained by Yugoslav standards.*

***Keywords:** lattice tower, suspension tower, European Standards, Yugoslav standards*