

IZDAVAČ / (PUBLISHER):

Savez građevinskih inženjera Srbije / *Association of Civil Engineers of Serbia*
Beograd, Kneza Miloša 9/I, Tel/Faks: (011) 3241 656

PROGRAMSKI ODBOR / (PROGRAMME COMMITTEE):

PREDSEDNIK / (CHAIRMAN): Emeritus Prof.dr Radomir FOLIĆ, FTN, Novi Sad, Srbija

ČLANOVI / (MEMBERS):

Predrag POPOVIĆ, Wiss, Janney, Elstner Associates, Nortbruk, Ilinoj, SAD
Prof.dr Zlatko MARKOVIĆ, Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
Dr Nenad ŠUŠIĆ, Institut IMS, Beograd, Srbija
Prof.dr Radenko PEJOVIĆ, Građevinski fakultet, Podgorica, Crna Gora
Prof. dr Radomir ZEJAK, Građevinski fakultet, Podgorica, Crna Gora
Prof.dr Nađa KURTOVIĆ-FOLIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
Prof.dr Srđan KOLAKOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
Prof.dr Igor JOKANOVIĆ, Građevinski fakultet Subotica, Srbija
Prof.dr Vlastimir RADONJANIN, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
Prof.dr Mirjana MALEŠEV, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
Prof.dr Dragoslav STOJIC, Građevinsko – arhitektonski fakultet, Niš, Srbija
Prof.dr Miroslav BEŠEVIĆ, Građevinski fakultet, Subotica, Srbija
Doc. dr Nenad FRIC, Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
Prof.dr Dubravka BJEGOVIĆ, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska
Prof.dr Doncho PARTOV, VSU, Sofija, Bugarska
Prof.dr Daniel DAN, Univerzitet Temisvar, Rumunija
Prof.dr Damir VAREVAC, Osjek, Hrvatska
Prof.dr Asterios LIOLIOS, Democratus Univerzitet Trakije, Grčka
Prof. dr Zlatko ZAFIROVSKI, Univerzitet Sv. Kirilo i Metodije, Skoplje, Severna Makedonija
Dr ANAMARIA FEIER, Univerzitet Temišvar, Rumunija
Akademik Yachko IVANOV, Univerzitet VSU, Sofija, Bugarska
Prof.dr Michael FORDE, Univerzitet Edinburg, Ujedinjeno Kraljevstvo
Prof.dr Jose ADAM, ICITECH, Departman za konstrukcije, Valensija, Španija
Prof.dr Damir ZENUNOVIĆ, Rudarsko-geološko-gradjevinski fakultet, Tuzla, BiH
Prof.dr ROBERTA APOSTOLSKA, IZIIS Skoplje, Makedonija

EDITOR / (Editor in Chief): Prof.dr Radomir FOLIĆ

TEHNIČKI UREDNIK / (Editor): V. prof. dr Aleksandar ĐUKIĆ

Svi radovi u ovom zborniku radova su recenzirani. Stavovi izneti u ovoj publikaciji ne odražavaju nužno i stavove izdavača, naučnog komiteta ili editora.

TIRAŽ (Print run): 150

SAVEZ GRAĐEVINSKIH INŽENJERA SRBIJE

u saradnji sa

ADING D.O.O.

pod pokroviteljstvom

MINISTARSTVA PROSVETE, NAUKE I TEHNOLOŠKOG RAZVOJA REPUBLIKE SRBIJE

ZBORNIK RADOVA

DVANAESTOG NAUČNO-STRUČNOG MEĐUNARODNOG
SAVETOVANJA

**OCENA STANJA, ODRŽAVANJE I
SANACIJA GRAĐEVINSKIH
OBJEKATA**

*TWELFTH INTERNATIONAL CONFERENCE
ASSESSMENT, MAINTENANCE AND REHABILITATION OF
STRUCTURES*

CONFERENCE PROCEEDINGS

Editor: Prof. dr Radomir Folić

Vrnjačka Banja, 29. jun – 1. jul 2022.

**DVANAESTO MEĐUNARODNO NAUČNO – STRUČNO
SAVETOVANJE
OCENA STANJA, ODRŽAVANJE I SANACIJA GRAĐEVINSKIH
OBJEKATA**

Originalni naučni rad

Nenad Pecić¹, Uglješa Radosavljević²

**PROCENA STANJA TEMELJNIH KONSTRUKCIJA TURBO-GENERATORA
BLOKOVA A1 I A2 TERMO ELEKTRANE „NIKOLA TESLA“**

Rezime: U radu je prikazana metodologija koja je primenjena kod kontrolnih proračuna dva armiranobetonska turbo-stola termoelektrane „Nikola Tesla“ u Obrenovcu. Proračuni su rađeni sa ciljem utvrđivanja stanja konstrukcija nakon višedecenijske eksploatacije i procene mogućnosti njihovog daljeg korišćenja. Opisan je način formiranja proračunskog modela sa naglaskom na što preciznije modeliranje krutosti radi adekvatnog sagledavanja ponašanja pod dinamičkim opterećenjem. Model je kalibrisan upotrebom merenih vrednosti parametara materijala i registrovanih dinamičkih karakteristika u radnom režimu i pri isključenoj opremi.

Ključne reči: betonski temelj, parna turbina, dinamički proračun, modeliranje.

**ASSESSMENT OF THE CONDITION OF CONCRETE PEDESTALS OF
TURBO-GENERATORS A1 AND A2 IN THE POWER PLANT
„NIKOLA TESLA“**

Summary: The paper presents the methodology applied in the control calculations of two reinforced concrete pedestals for turbines of the power plant "Nikola Tesla" in Obrenovac. The calculations aimed to determine the condition of the facilities after decades of exploitation and assess the possibility of their further use. Finite element analysis modeling is described with an emphasis on accurate stiffness modeling to adequately study the behavior under dynamic loading. The model was calibrated using the measured values of material parameters and registered dynamic characteristics both in operating mode and with the equipment switched off.

Keywords: concrete pedestal, steam turbine, structural dynamic analysis, modeling.

¹ Dr, dipl.građ.inž., vanr. prof., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73, peca@imk.grf.bg.ac.rs

² Dipl.građ.inž., Senior CSA Engineer, Bechtel Mining & Metals, Beograd, Bulevar Milutina Milankovića 1i, uginjo@sbb.rs

1. UVOD

Aktivnosti čiji su rezultati prikazani u ovom radu preduzete su kako bi se proverila mogućnost da se postojeći sklopovi turbine-generator blokova A1 i A2 TENT-a, nakon višedecenijske upotrebe, zamene novim postrojenjima. Da bi se nastavilo sa korišćenjem svih ostalih delova postrojenja, pre svega prostora i konstrukcija u mašinskoj hali, plan Investitora je da zamenu izvrši sa sklopovima sličnih karakteristika (u pogledu gabarita, načina oslanjanja, težinskih i dinamičkih karakteristika), koji bi se montirali na postojeće konstrukcije temelja (turbo-stolove).

Za sveobuhvatno sagledavanje konstrukcija turbo-stolova sa aspekta mogućnosti njihove dalje upotrebe za nošenje sklopova turbo-generatora postavljeno je nekoliko zadataka:

- Utvrđivanje kvaliteta i stanja konstrukcijskih materijala;
- Sagledavanje aktuelnih dinamičkih karakteristika sistema oprema-konstrukcija-temeljno tlo;
- Kapaciteta nosivosti konstrukcija prema izvedenom stanju i utvrđenim osobinama prema napred navedenim ispitivanjima.

Preduzete radnje obuhvataju tri celine:

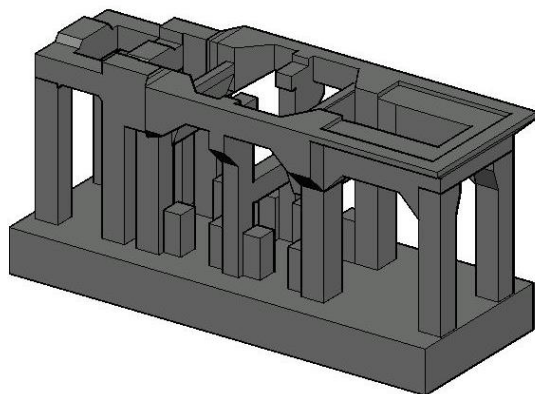
- (1) Pregled konstrukcije, uzimanje uzoraka betona i njihovo ispitivanje, sa ciljem utvrđivanja stanja i merenja vrednosti relevantnih parametara. Ovaj posao obavili su stručnjaci Laboratorije za materijale Građevinskog fakulteta u Beogradu, pod rukovodstvom prof. Dimitrija Zakića;
- (2) Merenje vibracija konstrukcija van radnog režima (sopstvene oscilacije) i pri radu (prinudne oscilacije, primarno usled neizbalansiranosti masa). Zadatak realizovali su stručnjaci Laboratorije za ispitivanje konstrukcija Građevinskog fakulteta u Beogradu, pod rukovodstvom prof. Zorana Miškovića;
- (3) Proračun naprezanja i nosivosti konstrukcije turbostola, sintezom prethodno utvrđenih karakteristika pod (1) i (2), a na osnovu podataka iz raspoložive dokumentacije i relevantnih domaćih i inostranih standarda. Primenjena metodologija celine (3) prikazana je u ovom radu.

2. OPIS KONSTRUKCIJA

Turbo-stolovi blokova A1 i A2 TENT-a projektovani su i izrađeni kao identične konstrukcije, za nošenje postrojenja ruske proizvodnje. Projekat konstrukcije urađen je od strane preduzeća „Energoprojekt“ iz Beograda 1967. godine. Vodeći projektant građevinskog dela bio je inž. Radoslav Šojić, a projektant konstrukcije inž. Vidoje Veljković. Proračun je urađen prema složenim zahtevima predviđenim za ovakve konstrukcije i uz korišćenje tada relevantne inostrane i domaće literature. Može se reći da je, u odnosu na računске mogućnosti toga vremena, izvanrednog kvaliteta. Kompleksnost ovog posla može se naslutiti već iz složenosti oplata, koja je prikazana na Slici 1.

Originalni proračun je obuhvatio naprezanje konstrukcije od relevantnih opterećenja - sopstvene težine, težine opreme, dinamičkih uticaja koji se mogu javiti u eksploataciji i temperaturnih efekata. Urađen je proračun horizontalnih, vertikalnih i torzionih oscilacija. Imajući u vidu vreme izrade projekta, proračun nije uključivao seizmičko opterećenje.

Zbog ograničenih računskih mogućnosti toga vremena najveći izazov predstavljali su proračuni dinamičkih karakteristika konstrukcije, koje su ključne za sagledavanje njenog ispravnog funkcionisanja u eksploataciji. Konstrukcije su projektovane kao tzv. „nisko sintonizovane“ – to jest sopstvene frekvencije konstrukcija su (dovoljno) manje od radne frekvencije turbo-sklopa. Usled toga one su izložene neizbežnim prolaznim rezonantnim stanjima pri pokretanju/zaustavljanju agregata prilikom poklapanja sopstvenih vrednosti konstrukcije sa kritičnim brojem obrtaja pojedinih mašina. Dinamički proračuni odnosili su se na sopstvene frekvence i amplitude pri radnom režimu turbine (3000 obrt/min), kao i na ponašanje pri pokretanju sistema u odnosu na kritične frekvence podsklopova (rotora visokog, srednjeg i niskog pritiska i generatora). Kriterijumi za proračune preuzeti su iz (tadašnje verzije) nemačkog DIN 4024 i, s obzirom da su postrojenja ruske proizvodnje, iz sovjetskih normi TU 60-49. Generalna metodologija proračuna prikazana je literaturi [3].



Slika 1: Oplata konstrukcije turbostola

Glavni noseći sistem čini šest poprečnih armiranobetonskih „П“ ramova raspona od 6.0 m do 6.5 m. Stubovi ramova imaju približno kvadratni poprečni presek i na svom donjem kraju su uklješteni u masivnu temeljnu ploču. Poprečni ramovi su u svojim gornjim temenima povezani podužnim armiranobetonskim gredama formirajući dva podužna petopoljna rama, sa rasponima 9.03 + 6.35 + 6.35 + 2.65 + 5.15 m. Gornja ploča turbo-stola je armiranobetonska, služi za smeštaj i ankerisanje mašina. Visina stubova je oko 10.0 m. U srednjem delu su postavljeni kratki stubovi – postamenti koji imaju ulogu oslonaca kondenzatora. Temelj konstrukcije je masivna 320 cm debela armiranobetonska ploča dužine 32.0 m i širine 12.0 m. Temeljna ploča se ne oslanja direktno na tlo, već je izvedena u prethodno izrađenoj armiranobetonskoj kadi sa hidroizolacijom i oblogom od dasaka, radi zaštite od uticaja povremene visoke podzemne vode. Originalni proračun obuhvatio je uticaje težina konstrukcije i opreme, uticaje od rada opreme i od kratkog spoja generatora, uticaje temperature i skupljanja betona. Analiza je, osim presečnih sila,

sadržala proračun frekventnih karakteristika elemenata konstrukcije i pomeranja u radnom režimu. Konstrukcija je projektovana od betona MB 30 i sa glatkom armaturom Č37. Dimenzionisanje je, u skladu sa tada važećim propisima, urađeno prema teoriji dopuštenih napona.

3. KONCEPT INOVIRANIH PRORAČUNA

Inovirani proračuni konstrukcija urađeni su na složenim integralnim modelima, koji uvažavaju geometrijsku složenost konstrukcije, ali i efekte odgovora temeljnog tla, što sve nije bilo moguće u originalnim projektima. Ono što je izvesno pri ovakvim alternativnim proračunima jeste da se dobijaju različite vrednosti naprezanja u preseccima elemenata u odnosu na projekte prema kojim je konstrukcija izgrađena. Ipak, pri sagledavanju postojanja potrebnih kapaciteta nosivosti sa aspekta sadašnje regulative, računalo se na robustno dimenzionisanje, koje se uobičajeno primenjivalo kod ovakvog tipa konstrukcija.

Potrebni proračuni sprovedeni su u tri faze.

U prvoj fazi izvršeno je formiranje modela. Sačinjena su po dva modela za svaku konstrukciju – za statičke i za dinamičke proračune. Modeli konstrukcije izvedeni su iz “realne” geometrije. Prvi model (za statičke proračune) sačinjen je sa odgovarajućim (merenim) vrednostima modula elastičnosti betona. Za dinamičke proračune koristi se drugi model u kome se uzima korespondentni dinamički modul betona prema BS8110-2 [1].

U drugoj fazi urađena je procena ekscentričnosti pokretnih (obrtnih) masa – masa rotora. Realno, mase pojedinačnih mašina imaju različite stepene ekscentričnosti, ali se procena pojedinačnih ekscentričnosti ne može uraditi merenjem, s obzirom da se sve (po)kreću istovremeno. Kao metod kalibracije prosečne (ekvivalentne) ekscentričnosti usvojen je kriterijum izjednačavanja računskih i registrovanih (merenih) maksimalnih brzina i maksimalnih amplituda pri radnom režimu postrojenja.

U trećoj fazi, izvršeno je izračunavanje presečnih sila za relevantne kombinacije opterećenja. Ukupni uticaji dobijeni su sumiranjem presečnih sila iz navedena dva modela. Urađen je proračun potrebne armature stubova i greda konstrukcije dimenzionisanjem u odnosu na dobijene ekstremne uticaje, za utvrđenu čvrstoću betona, koja je potom upoređena sa planovima konstrukcija. Na osnovu ovoga izvedeni su zaključci o nivou sigurnosti postojećih konstrukcija u odnosu na aktuelna opterećenja u smislu novih srpskih propisa (Evrokodova za konstrukcije).

3.1. Modeliranje konstrukcije

3D proračunski modeli izrađeni su u programskom paketu “Robot Structural Analysis Professional”. Konstrukcija je modelirana kombinacijom linijskih i pločastih elemenata, sa ciljem da se omogući efikasno sagledavanje relevantnih presečnih sila s jedne strane, kao i da se omogući sprovođenje time-history analize i pretraga rezultata u razumnom vremenu. Sistemne linije i ravni postavljene su na mestima (nivoima) težišta pojedinih elemenata, što, zbog znatnih veličina preseka u odnosu na sistemski raspon ima velikog uticaja na krutost sistema (modela), koja je od presudnog uticaja na kvalitet dinamičkog proračuna. Da bi se krutost modela usaglasila sa efektivnim („svetlim“) rasponima uređene su dve vrste korekcija. U vertikalnom pravcu visina stubova u modelu

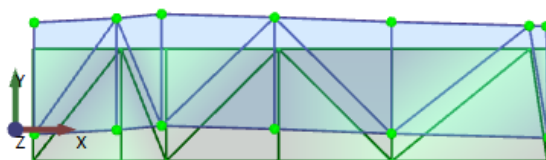
umanjena je na vrednost koja odgovara svetlom otvoru, a uticaji se čitaju u čvorovima sistema (odgovara uticajima na fizičkom kontaktu elemenata). U horizontalnim pravcima (podužni, poprečni) ovakva intervencija (prilagođavanje dužina) za usaglašavanje krutosti nije prikladna zbog postavljanja opterećenja. Umesto promene dužina, krutost gornje strukture je usaglašena povećanjem modula elastičnosti betona za sve elemente (grede, podužne i poprečne) koji formiraju gornju noseću površinu. Analize odnosa pojedinačnih krutosti pokazale su da udvostručavanje modula obezbeđuje adekvatni doprinos krutosti. Težine pojedinih delova mašinske opreme postrojenja i napadne tačke postavljene su prema Glavnom projektu konstrukcije. Prvi model koristi statički modul za beton. Izmerena vrednost bila je oko 26 GPa za A1, odnosno 32 GPa za A2. U drugom modelu upotrebljen je odgovarajući računski dinamički modul prema BS 8110-2 [1] koji je za A1 iznosio oko 32 GPa, a za A2 oko 41 GPa.

3.2. Modeliranje tla

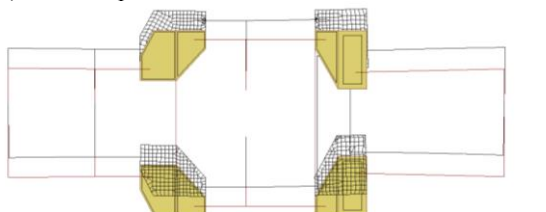
Temeljna spojnica se nalazi u sloju šljunkovitog peska, sa visokim nivoom podzemne vode koji sezonski varira. S obzirom da je konstrukcija izvedena pre skoro 50 godina, i da je od tada postrojenje u eksploataciji, može se smatrati da je temeljno tlo dodatno sabijeno u tom periodu. Takođe, uzeti su u obzir drugačiji geotehnički uslovi u poprečnom i podužnom horizontalnom pravcu konstrukcije turbo-stola (u poprečnom pravcu, na umerenoj udaljenosti, su ostali turbo stolovi bloka koji takođe iskazuju dinamičke uticaje, dok su u podužnom pravcu, relativno dalje, dinamički pasivni temelji noseće konstrukcije mašinske sale glavnog pogonskog objekta).

Tlo je modelirano horizontalnim i vertikalnim površinskim osloncima (oprugama). Karakteristike tla su postulirane na osnovu podataka iz geomehaničkih elaborata za lokaciju, a potom je izvršena kalibracija vrednosti, tako da se usaglase računске frekvence i sopstveni oblici sa odgovarajućim registrovanim (merenim) ambijentalnim oscilacijama (prva tri tona, pri isključenim postrojenjima; konstrukcije osciluju usled rada preostalih turbo-sklupova u mašinskoj hali – pobuda vibracijama preko temelja).

(a): registrovani prvi ton, 3.9 Hz



(b): računski prvi ton, 3.897Hz

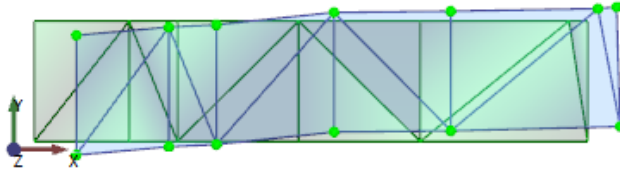


Frequency: 3.897 (Hz)

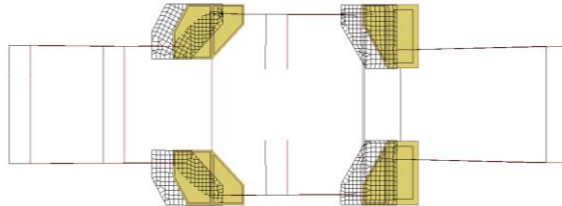
Slika 2: Oblici prvog tona turbo-stola A2

Dobijene krutosti tla (35000 za podužni horizontalni pravac, 56000 za poprečni horizontalni pravac i 80000 kN/m³ za vertikalni pravac) odgovaraju uobičajenim veličinama dinamičkih krutosti za predmetno temeljno tlo i dubinu temeljenja. Ove vrednosti su korišćene za oba modela. Postignuta je usaglašenost računskih i merenih frekvenci sopstvenih oscilacija za prva tri osnovna tona sa prosečnim odstupanjem od 9.9 % za A1, odnosno svega 1.7 % za A2. Oblici su takođe saglasni sa registrovanim (merenim) ambijentalnim oscilacijama.

(a): registrovani drugi ton, 4.4 Hz



(b): računski drugi ton, 4.47 Hz



Frequency: 4.47

Slika 3: Oblici drugog tona turbo-stola A2

Na Slikama 2 i 3 prikazani su registrovana prva dva tona ambijentalnih oscilacija turbo-stola A2 (a) i odgovarajući računski tonovi modalne analize, nakon kalibracije (b). Pogled je odozgo, a prikazani su elementi gornje ploče. Frekvence ovih tonova se kod turbo-stola A2 praktično ne razlikuju.

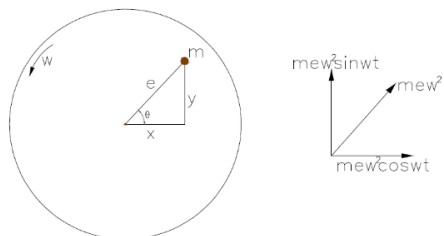
3.3. Opterećenja

Za definisanje opterećenja korišćeni su podaci iz originalnog projekta, podaci o opremi dostavljeni od strane Investitora, a deo opterećenja je kreiran direktno softverom (težina konstrukcijskih elemenata, seizmičko opterećenje). Razmatrana su sledeća opterećenja:

- sopstvena težina armiranobetonske konstrukcije;
- težine mašinske i druge opreme;
- temperatura $T = + 15^{\circ}\text{C}$;
- temperatura $T = - 15^{\circ}\text{C}$;
- moment kratkog spoja generatora;
- dinamičko opterećenje (inercijalne sile pri pokretanju sistema i pri radu);

- seizmičko opterećenje u poprečnom Y pravcu;
- seizmičko opterećenje u podužnom X pravcu.

Dinamičko opterećenje je modelirano pomoću horizontalne i vertikalne sile usled neizbalansiranosti masa, Slika 4, na mestima oslanjanja pojedinih sklopova. Horizontalna komponenta se menja po kosinusnom ($\cos(\omega t)$), a vertikalna po sinusnom ($\sin(\omega t)$) zakonu. Neizbalansirana veličina (me) uzeta je kao maksimalna prema DIN 4024-1 [4], prema masama sklopova. Razmatrane su sve relevantne frekvence (ω), koje su navedene u nastavku.

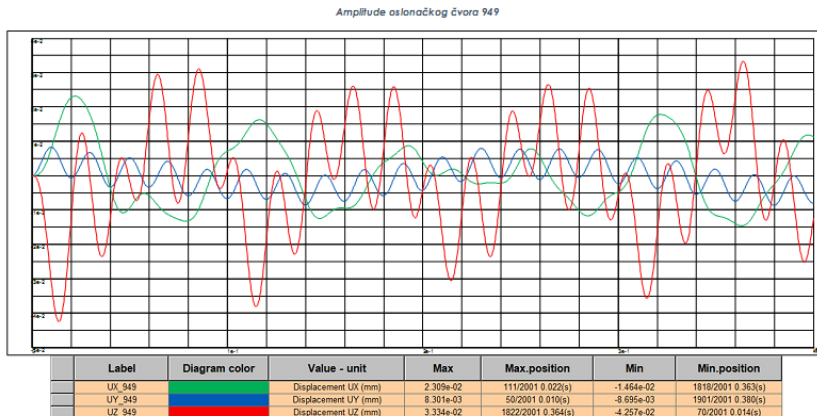


Slika 4:Komponente dinamičkog opterećenja

Seizmičko opterećenje određeno je prema SRPS EN 1998-1 [6], za osnovno ubrzanje $a_g = 0.1g$ prema karti seizmičkog hazarda za povratni period od 475 godina (s obzirom da nije utvrđivana seizmičnost mikrolokacije) i za tlo kategorije C.

3.4. Procena neizbalansiranih sila

Prosečna (ekvivalentna) ekscentričnost procenjena je izjednačavanjem računskih i registrovanih (merenih) maksimalnih brzina i maksimalnih amplituda pri radnom režimu postrojenja (prinudne oscilacije). Računske amplitude dobijene su primenom harmonijske pobude na mestima oslanjanja rotora, dinamičkim proračunom („time history“ analiza) sa korakom od 0.0002 sekunde. Proračun je urađen za maksimalne prihvatljive vrednosti neizbalansiranih sila prema DIN 4024-1 [4] za ovu vrstu postrojenja. Sile su proporcionalne masama pojedinih rotora, sa istim faktorom proporcionalnosti. Na Slici 3 prikazan je rezultat proračuna amplituda za jednu od repnih tačaka.



Slika 3: Sračunate amplitude za jedno merno mesto turbo-stola A2

Upoređivanjem maksimalnih, merenjem registrovanih, bočnih amplituda i poprečnih brzina sa odgovarajućim računskim vrednostima dobijenim iz dinamičkog modela, za 12 mernih tačaka, dobijene su prosečne vrednosti neizbalansiranih sila u iznosu od 21 – 28 % (A1 – A2, iz poprečnih pomeranja) i 40 – 50 % (A1 – A2, iz poprečnih brzina) od vrednosti koja odgovara maksimalnoj prihvatljivoj ekscentričnosti, što ukazuje na još uvek zadovoljavajuće ponašanje postrojenja. Razlike u vrednostima za pojedinično postrojenje u najvećem potiču od pretpostavke o jedinstvenoj ekscentričnosti za sve podsklopove, dok se one u stvarnosti međusobno razlikuju. Dinamički proračun (treća faza) je urađen sa maksimalnom prihvatljivom ekscentričnošću (100 % prema DIN 4024-1, [4]). Maksimalna ekscentričnost izabrana je sa ciljem da se ispita da li konstrukcija može da nosi opremu u čitavom opsegu prihvatljivih radnih performansi.

4. PRORAČUNI

Inovirani proračun urađen je na sa ciljem da se, u kontekstu planirane zamene postrojenja novim, proceni mogućnost nastavka korišćenja konstrukcije turbo-stolova. U međuvremenu je došlo do promene propisa za projektovanje građevinskih konstrukcija. To je druga izmena propisa za projektovanje betonskih konstrukcija u odnosu na regulativu koja je primenjena u originalnom Glavnom projektu konstrukcije turbo stola.

Svrshishodnost inoviranog proračuna ogleda se, pre svega, da se sa savremenim proračunskim mogućnostima, koje su mnogostruko veće u odnosu na one kojima se raspolagalo pri projektovanju, provere rezultati na osnovu kojih je u originalnom projektu koncipirana konstrukcija. Drugi bitan razlog jeste tretiranje seizmičkog opterećenja koje nije bilo obuhvaćeno originalnim projektom.

Za proračune su oformljena dva modela konstrukcije.

U prvom modelu određivani su uticaji od stalnih tereta (težina konstrukcije i opreme), temperature i kratkog spoja generatora. Sproveden je i seizmički proračun, što nije bilo obuhvaćeno originalnim projektom.

Drugi model je korišćen za određivanje generalnih dinamičkih karakteristika i dinamičkih presečnih sila od neizbalansiranih masa. Svaka od značajnih radnih

frekvencija opreme (3000 obrt/min za normalni radni režim, 1750 obrt/min za kritičnu brzinu rotora visokog pritiska, 1780 obrt/min za kritičnu brzinu rotora srednjeg pritiska, 1610 obrt/min za kritičnu brzinu rotora niskog pritiska i 1350 obrt/min (22.5 Hz) za kritičnu brzinu rotora generatora) je detaljno analizirana na dinamičkom modelu konstrukcije. Modalna analiza pokazala je da se u prvih desetak tonova angažuje preko 98 % mase u sva tri glavna pravca oscilovanja, pri čemu frekvencija sopstvenih oscilacija ne prelazi 14 Hz (prva tri tona do 5 Hz, naredna tri do 10.5 Hz). S obzirom da je prva kritična frekvencija opreme 22.5 Hz (rotor generatora), može se reći da je konstrukcija odlično usklađena u odnosu na rezonantna stanja, što je nedvosmisleno potvrđeno i višedecenijskom uspešnom eksploatacijom.

Dinamički proračun sproveden je „time-history“ analizom za harmonijsku pobudu prema pokretnim masama, za radni režim i za kritične frekvence svih podsklopova. Rezultati dinamičke analize prikazani su u obliku anvelope. Pokazalo se da su kritične brzine relevantne za dobijanje maksimalnih dinamičkih uticaja (presečnih sila) u odnosu na normalni radni režim, što je očekivano s obzirom da je radna frekvencija od 50 Hz „najudaljenija“ od dinamičkih karakteristika sklopa konstrukcija-postrojenje. Dinamički proračuni uključivali su i određivanje (amplituda) pomeranja u radnom režimu.

Ukupni uticaji dobijeni su sumiranjem presečnih sila iz navedena dva modela. Na osnovu dobijenih presečnih sila izvršena je kontrola preseka elemenata u smislu određivanja potrebne armature i izvršeno poređenje sa ugrađenom armaturom prema projektnoj dokumentaciji. Na osnovu ovoga izvedeni su zaključci o nivou sigurnosti postojećih konstrukcija u odnosu na aktuelna opterećenja u smislu novih srpskih propisa za betonske konstrukcije EN 1992-1-1 [5].

5. DOBIJENI REZULTATI

Konstrukcija tokom višedecenijske eksploatacije nije iskazala probleme pri upotrebi, u smislu nošenja aktuelnog postrojenja sa zadovoljavajućim performansama.

Rezultati proračuna u odnosu na naprezanje savijanjem pokazali su postojanje dovoljne nosivosti u svim razmatranim presecima, za sve proračunske situacije, uključujući i seizmičke.

Rezultati proračuna u odnosu na naprezanje smicanjem pokazali su nedovoljnu nosivost nekih od razmatranih elemenata prema EN 1992-1-1 [5], za pojedine proračunske situacije, pre svega seizmičke. Ovde treba posebno istaći da to nije rezultat manjkavosti originalnog projekta, niti posledica razmatranja seizmičkog opterećenja, koje nije bilo obuhvaćeno originalnim projektom. Znatno deo pozicija nema minimalnu armaturu za naprezanje smicanjem. S druge strane, novi srpski propis za betonske konstrukcije Evrokod 2, [5], ovakvim elementima dopušta znatno manju nosivost pri smicanju u odnosu na ranije srpske, ali i inostrane propise. Upravo zbog toga je urađen i proračun nosivosti pri smicanju prema prethodnom srpskom pravilniku za betonske konstrukcije. Proračun prema Pravilniku BAB 87 [7], koji je bio u višedecenijskoj primeni, pokazao je dovoljnu nosivost pri smicanju za sve proračunske situacije. Investitoru je sugerisano da bi, pre odluke o eventualnom ojačavanju konstrukcija u cilju usaglašavanja nosivosti sa novim standardom EN 1992-1-1 [5], trebalo pribaviti podloge o novoj opremi i podatke o seizmičnosti mikrolokacije. Može se očekivati da bi odgovarajući proračun smanjio broj upitnih elemenata u odnosu na naprezanje pri smicanju. Takođe, nije za zanemarivanje ni činjenica da nova verzija Evrokoda za beton

(za sada objavljena kao prEN 1992-1-1: 2021 [2], čije se usvajanje očekuje za nekoliko godina) donosi znatne izmene u postupku proračuna nosivosti betonskih elemenata pri smicanju.

Dinamički proračun je dao zadovoljavajuće rezultate u pogledu maksimalnih pomeranja u radnom režimu i potvrdio suštinsku stabilnost u odnosu na rezonantna stanja.

6. ZAKLJUČCI

Cilj ovog saopštenja je da ukaže na mogućnosti kombinovanja eksperimentalnih rezultata i savremenih metoda proračuna prilikom modeliranja konstrukcija u slučajevima tretiranja kompleksnih problema. Osnovni benefit ovakvog pristupa, onda kada je on moguć, jeste uvećanje pouzdanosti samih proračuna kroz kontrolu adekvatnosti primenjenih modela.

Kod razmatranih konstrukcija, prethodno eksperimentalno ispitivanje konstrukcije (određivanje efektivnih karakteristika ugrađenog betona i merenje ambijentalnih i prinudnih vibracija) dalo je mogućnost za definisanje parametara tla (čije merenje nije bilo moguće) i stvorilo solidnu osnovu za fino kalibrisanje modela prema realnom ponašanju konstrukcije. S druge strane, u domenu veličina za koje precizna kalibracija nije bila moguća na osnovu merenih podataka, urađeni su proračuni na strani sigurnosti (princip anvelope). To se odnosilo na određivanje dinamički izazvanih naprezanja usled neizbalansiranih masa rotora, kao i na naprezanje usled seizmike, za koje su podaci uzeti sa nacionalne karte.

Sprovedeni proračuni i analize konstrukcija turbo stolova A1 i A2 TENT-a pokazuju da originalno tehničko rešenje i trenutno stanje konstrukcije nude mogućnost daljeg korišćenja. Međutim, u kontekstu inženjerske struke, trebalo bi posebno podvući da su impresivni dometi projektanata koji su u uslovima nepostojanja napredne elektronske računarske opreme projektovali besprekorne konstrukcije.

7. REFERENCE

- [1] British Standards Institution: BS 8110-2: 1985: Structural use of concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances.
- [2] CEN/TC250: prEN 1992-1-1: 2021: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules - Rules for buildings, bridges and civil engineering structures.
- [3] Debeljković, M.: Temelji mašina – proračun i konstrukcija, Energoprojekt-Industrija, Beograd, 1995.
- [4] Deutsches Institut für Normung: DIN 4024-1: 1988: Maschinenfundamente; Elastische Stützkonstruktionen für Maschinen mit rotierenden Massen (Machine foundations; flexible structures that support machines with rotating elements).
- [5] Institut za standardizaciju Srbije: SRPS EN 1992-1-1: 2015: Evrokod 2 – Projektovanje betonskih konstrukcija – Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade.
- [6] Institut za standardizaciju Srbije: SRPS EN 1998-1: 2015: Evrokod 8: Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija - Deo 1: Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade.
- [7] Savezni zavod za standardizaciju: Pravilnik o tehničkim normativima za beton i armirani beton, Službeni list SFRJ br. 11/1987, Beograd.