

## KALIBRACIJA DINAMIČKE SILE U VISOKOFREKVENTNOM PULZATORU

## CALIBRATION OF DYNAMIC FORCE IN HIGH-FREQUENCY PULSATOR

**Samir Lemeš**  
University of Zenica  
Mechanical Engineering Faculty  
Zenica  
Bosnia and Herzegovina

**Derviš Emruli**  
Metallurgical Institute  
"Kemal Kapetanović"  
Zenica  
Bosnia and Herzegovina

**Branka Muminović**  
Metallurgical Institute "Kemal Kapetanović"  
Zenica  
Bosnia and Herzegovina

### REZIME

*Ovo istraživanje je provedeno da bi se izvršila kalibracija dinamičke sile u visokofrekventnom pulzatoru, u skladu sa zahtjevima standarda ISO 4965/2005 korištenjem kalibrisanog pretvarača za silu umjesto elektrootpornih mjernih traka.*

*Prethodno izdanje ovog standarda je zahtijevalo da se kalibriše samo prosječna sila u visokofrekventnom pulzatoru. Novi standard zahtijeva i da se kalibriše amplituda sile. Za kalibraciju je korišten pretvarač za silu koji radi na principu mjernih traka. Rezultati su pokazali da visokofrekventni pulzator radi u propisanim granicama, te da se pretvarač za silu može koristiti za kalibraciju dinamičke sile.*

**Ključne riječi:** kalibracija, statička sila, dinamička sila, pretvarač

### SUMMARY

*This research was performed in order to calibrate the dynamic force in high-frequency pulsator, in accordance with standard ISO 4965/2005 by using force transducer instead of strain gauges.*

*Previous issue of the standard required only mean force to be calibrated in high-frequency pulsator. The new standard requires also calibration of force amplitude. The force transducer based on strain gauges was used to perform calibration. The results showed that high-frequency pulsator performs within prescribed limits, and that force transducer can be used to calibrate the dynamic force.*

**Keywords:** calibration, static force, dynamic force, transducer

### 1. UVOD

Mehanički laboratorij Metalurškog instituta "Kemal Kapetanović" Univerziteta u Zenici posjeduje visokofrekventni (VF) pulzator za dinamička ispitivanja 10 HFP 422, koji služi za ispitivanje dinamičkih karakteristika materijala, koje se manifestuju kao zamor materijala.

VF pulzator za dinamička ispitivanja 10 HFP 422 (Slika 1, Slika 2) služi za određivanje dinamičke čvrstoće pri opterećivanju zatezanjem, pritiskivanjem, zatezanjem i pritiskivanjem, savijanjem i uvijanjem, kako na sobnim temperaturama tako i na povišenim temperaturama. Na ovom pulzatoru se može odrediti dinamička čvrstoća cijelih konstrukcionih dijelova ako ne izlaze izvan definisanih performansi mašine. Frekvencije ispitivanja koje se koriste za ispitivanja u zavisnosti od opterećenja su date u Tabeli 1.



Slika 1. Izgled VF pulzatora 10 HFP 422

Tabela 1. Vrijednosti frekvencija ispitivanja za različita opterećenja

Frekvencija ispitivanja (Hz)	Opterećenje (kN)
35 – 240	20
60 – 300	100
50 – 200	450



Slika 2. Upravljački ormarić VF pulzatora

VF pulzator se ranije kalibrisao prema standardu BAS EN ISO 7500-1:2005 [1], koji je podrazumijevao statičku kalibraciju odnosno kalibraciju  $\sigma_{sr}/F_{sr}$ . Usvajanjem novog standarda ISO 4965:2005 [2] promijenjeni su zahtjevi za kalibraciju, tako da se osim srednjih napona i sila ( $\sigma_{sr}$ ,  $F_{sr}$ ) moraju kalibrirati i amplitudni naponi, odnosno sile ( $\sigma_a$ ,  $F_a$ ).

Analizom dosadašnjih istraživanja, došlo se do saznanja da bi se za kalibraciju uređaja za dinamička ispitivanja mogle koristiti različite vrste pretvarača: etaloni s mjernim trakama [2], piezoelektrični pretvarači [3], [4], kao i pretvarači koji rade na principu mjernih traka [5], [6].

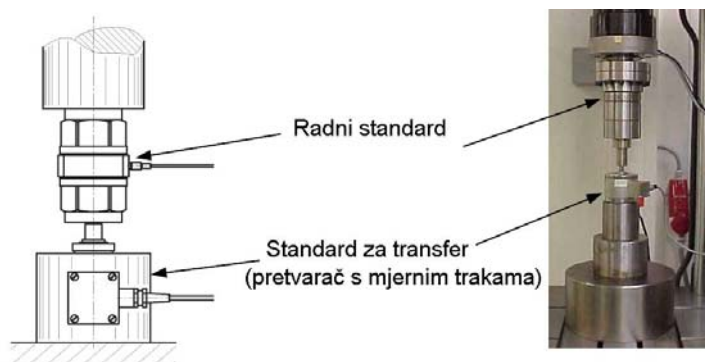
## 2. UREĐAJI ZA ISPITIVANJE NA ZAMOR

Uređaji za ispitivanje na zamor mogu se podijeliti na tri glavne vrste:

1. Klasične mašine za dinamička ispitivanja, koje ostvaruju sinusoidalna opterećenja konstantne amplitude i frekvencije, služe uglavnom za dobijanje poznatih Velerovih dijagrama, iz kojih se mogu odrediti karakteristične vrijednosti kod zamora materijala. Ovakve mašine se koriste za ispitivanje ingota, odnosno poluproizvoda.
2. Mašine za dinamička ispitivanja sa stepenasto promjenjivim opterećenjem kod kojih se vrijednost amplitude, frekvencije i broja ciklusa mogu mijenjati pomoću uređaja za programiranje.
3. Mašine za dinamička ispitivanja promjenjivim opterećenjem prema Random-postupku. Ovaj postupak se zasniva na simuliranju stvarnih opterećenja da bi se ispitivanjem utvrdio njihov uticaj.

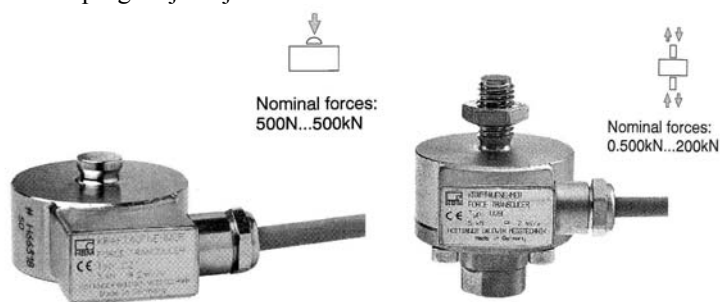
### 3. POSTUPAK KALIBRACIJE

Na slici 3 prikazana je standardna procedura kalibracije. Kalibracija se vrši sa etalonima za silu koji su kalibrisani tako da imaju sljedivost do primarnog etalona za silu.



Slika 3. Standardna procedura kalibracije [3]

Za kalibraciju mašine za ispitivanje na zamor u cijelom opsegu sile i radne frekvencije, obično je potrebno koristiti nekoliko pretvarača za silu. Na slici 4 su prikazani pretvarači korišteni za različite opsege mjerenja.



Slika 4. Pretvarači za silu koji su korišteni kao etaloni (proizvođač: HBM)

Na slici 5 je prikazan uređaj korišten za kalibraciju VF pulzatora, odnosno za registraciju izmjerenih veličina s pretvarača za silu..



Slika 5. Modularni uređaj za mjerenje HBM MGCplus

### 3.1. Dinamička kalibracija srednjih sila i opsega sila

Kod jednog broja srednjih vrijednosti sila, raspoređenih približno jednako po cijelom opsegu srednjih sila raspoloživih u normalnom radu ispitne mašine, nekoliko kalibracija se obavlja koristeći različite dinamičke opsege sile. Svaka serija mjerenja obuhvaća zadnjih pet određenih nivoa sile na približno jednakim intervalima između 20% i 100% od maksimalnog opsega skale. Nepromjenjivi zahtjevi za pretvarače sastoje se od:

- oblika signala;
- usklađenosti i geometrije pretvarača za silu;
- konfiguracije ispitne mašine, koja obuhvata pretvarač za silu i hvataljke;
- frekvencije;
- korištenih mjernih opsega.

Kalibracija će biti dva puta ponovljena za svaku srednju silu kako bi se dobile ukupno tri serije. U Tabeli 2 dat je primjer odabranih kombinacija opterećenja korištenih za kalibraciju. Kombinacije su izabrane u skladu s opsegom opterećenja.

Tabela 2. Zatezanje (ili pritisak) mašine za ispitivanje zamorom sa  $F_{amax} < F_{max}$   
(na primjer  $F_{amax} \approx 0,5F_{max}$ ) [2]

$F_m/F_{max}$	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
$F_R/F_{max}$	0,1	0,1		0,1	0,1
	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	0,3	0,3		0,3	0,3
	(0,4)	0,4	0,4	0,4	0,4
		0,5		0,5	
		0,6	0,6	0,6	
		0,7		0,7	
		(0,8)	0,8	0,8	
			(1,0)		

## 4. OBRADA DOBIJENIH VRIJEDNOSTI KALIBRACIJE

Nakon izvedene kalibracije, potrebno je izvršiti obradu dobijenih vrijednosti (statičkih i dinamičkih) kako bi se mogla odrediti klasa ispitnog uređaja. Dobijene vrijednosti se obrađuju analitički a prikazuju tabelarno.

### 4.1. Analitička obrada dobijenih dinamičkih vrijednosti kalibracije za mjernu tačku 15 kN (150/75)

Analitička obrada dobijenih dinamičkih vrijednosti kalibracije podrazumijeva potrebu da se izračunaju relativne greške: tačnosti, ponovljivosti, i srednje vrijednosti indiciranih amplitudnih sila dobijenih u toku kalibracije.

Primjer analitičke obrade vrijednosti rezultata kalibracije za mjernu tačku 15 kN se odnosi na obradu vrijednosti rezultata kod dinamičkog nanošenja sile na dinamičkom mjernom opsegu od 75 kN na VF pulzatoru koji se kalibrisao.

#### 4.1.1. Relativna greška tačnosti

Za određeni slučaj kalibracije izveden sa konstantnom stvarnom amplitudnom silom na etalonu i indiciranom amplitudnom silom na VF pulzatoru, relativna greška tačnosti,  $q$ , za  $(-)F_{R0,2}$  je data pomoću jednačine [2]:

$$q_{(-)F_{R0,2}} = \frac{\overline{F}_i - F}{F} \times 100 = \frac{2,95}{3} \times 100 = -1,67[\%]. \quad \dots (1)$$

Gdje je:

$\overline{F}_i$  - srednja vrijednost indiciranih amplitudnih sila za  $(-)F_{R0,2}$  očitanih na VF pulzatoru,  
 $F$  – stvarna amplitudna sila za  $(-)F_{R0,2}$  očitana na etalonu.

Za određeni slučaj kalibracije izveden sa konstantnom stvarnom amplitudnom silom na etalonu i indiciranom amplitudnom silom na VF pulzatoru, relativna greška tačnosti,  $q$ , za  $(+)F_{R0,2}$  je data pomoću jednačine [2]:

$$q_{(+)F_{R0,2}} = \frac{\overline{F}_i - F}{F} \times 100 = \frac{2,96 - 3}{3} = -1,33[\%]. \quad \dots (2)$$

Gdje je:

$\overline{F}_i$  - srednja vrijednost indiciranih amplitudnih sila za  $(+)F_{R0,2}$  očitanih na VF pulzatoru,  
 $F$  – stvarna amplitudna sila za  $(+)F_{R0,2}$  očitana na etalonu.

#### 4.1.2. Relativna greška ponovljivosti

Za određeni slučaj kalibracije izveden sa konstantnom stvarnom silom na etalonu, relativna greška ponovljivosti za  $(-)F_{R0,2}$  je data pomoću jednačine [2]:

$$b_{(-)F_{R0,2}} = \frac{F_{i\max} - F_{i\min}}{F} \times 100 = \frac{2,97 - 2,94}{3} \times 100 = 1,02[\%]. \quad \dots (3)$$

Gdje je:

$F_{i\max}$  – max indicirana amplitudna sila za  $(-)F_{R0,2}$  očitana na VF pulzatoru,  
 $F_{i\min}$  – min indicirana amplitudna sila za  $(-)F_{R0,2}$  očitana na VF pulzatoru,  
 $F$  – stvarna amplitudna sila  $(-)F_{R0,2}$  očitana na etalonu.

Za određeni slučaj kalibracije izveden sa konstantnom stvarnom silom na etalonu, relativna greška ponovljivosti za  $(+)F_{R0,2}$  je data pomoću jednačine [2]:

$$b_{(+)F_{R0,2}} = \frac{F_{i\max} - F_{i\min}}{F} \times 100 = \frac{2,99 - 2,94}{3} \times 100 = 1,69[\%]. \quad \dots (4)$$

Gdje je:

$F_{i\max}$  – max indicirana amplitudna sila za  $(+)F_{R0,2}$  očitana na VF pulzatoru,  
 $F_{i\min}$  – min indicirana amplitudna sila za  $(+)F_{R0,2}$  očitana na VF pulzatoru,  
 $F$  – stvarna amplitudna sila  $(+)F_{R0,2}$  očitana na etalonu.

#### 4.1.3. Srednja vrijednost indiciranih sila

Srednja vrijednost indiciranih amplitudnih sila za  $(-)F_{R0,2}$  se dobije kao aritmetička srednja vrijednost izmjerenih sila raspoređenih prema redoslijedu dobijanja, a treba biti izračunata korištenjem sljedeće jednačine:

$$\overline{F}_{(-)R_i} = \frac{F_{R0^0} + F_{R120^0} + F_{R240^0}}{3} = \frac{2,97 + 2,95 + 2,94}{3} = 2,95[\text{kN}]. \quad \dots (5)$$

Gdje je:

$F_{R0^0}$  - indicirana amplitudna sila očitana za  $(-)F_{R0,2}$  kod pozicije etalona  $0^0$ ,

$F_{R120^0}$  - indicirana amplitudna sila očitana za  $(-)F_{R0,2}$  kod pozicije etalona  $120^0$ ,

$F_{R240^0}$  - indicirana amplitudna sila očitana za  $(-)F_{R0,2}$  kod pozicije etalona  $240^0$ .

Srednja vrijednost indiciranih amplitudnih sila za  $(+)F_{R0,2}$  se dobije kao aritmetička srednja vrijednost izmjerenih sila raspoređenih prema redoslijedu dobijanja, a treba biti izračunata korištenjem sljedeće jednačine:

$$\bar{F}_{(+)\text{Ri}} = \frac{F_{R0^0} + F_{R120^0} + F_{R240^0}}{3} = \frac{2,99 + 2,95 + 2,94}{3} = 2,96[\text{kN}]. \quad \dots (6)$$

Gdje je:

$F_{R0^0}$  - indicirana amplitudna sila očitana za  $(+)F_{R0,2}$  kod pozicije etalona  $0^0$ ,

$F_{R120^0}$  - indicirana amplitudna sila očitana za  $(+)F_{R0,2}$  kod pozicije etalona  $120^0$ ,

$F_{R240^0}$  - indicirana amplitudna sila očitana za  $(+)F_{R0,2}$  kod pozicije etalona  $240^0$

## 5. ZAKLJUČCI

U ovom radu opisana je obrada dobijenih dinamičkih vrijednosti kalibracije, kao i praktičan primjer analitičke obrade vrijednosti rezultata za mjernu tačku 15 kN (150/75) koja se kalibrirala na VF pulzatoru. Na osnovu rezultata može se utvrditi da VF pulzator zadovoljava zahtjeve propisane standardom, te da se mjerni sistem MGCplus sa softverom catMan može upotrebljavati, pored kalibracije statičke sile, i za kalibraciju dinamičke sile na ovakvim i sličnim VF pulzatorima.

U daljim istraživanjima potrebno je odrediti mjernu nesigurnost ovog mjernog sistema, kao i utjecaj pojedinih faktora na veličinu mjerne nesigurnosti.

## 6. LITERATURA

- [1] Standard BAS EN ISO 7500-1:2005 *Metallic materials - Verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Verification and calibration of the force-measuring system*
- [2] Standard ISO 4965:2005 *Axial load fatigue testing machines - Dynamic force calibration - Strain gauge technique*
- [3] Kumme R., Mack O., Bill B., Haab H. R. (2003) *Investigation of Piezoelectric Force Measuring Devices in Force Calibration and Force Standard Machines*, Special Print, 920-232e-12.03 Mat2000, Kistler Instrumente AG
- [4] Garlan P., Rogers R. (2008) *Dynamic calibration of tri-axial piezoelectric force transducers*, Meas. Sci. Technol. 19 095202
- [5] Kumme R. (2008) *Procedures of force transducer calibration with periodical forces in the low and high frequency*, EURAMET Bucharest 2008
- [6] Kumme R. (2003) *A New Calibration Facility For Dynamic Forces Up To 10 KN*, Proceedings, XVII IMEKO World Congress, June 22 – 27, 2003, Dubrovnik, Croatia, pp 305-308
- [7] Elster C., Link A., Bruns T. (2007) *Analysis of dynamic measurements and determination of time-dependent measurement uncertainty using a second-order model*, Meas. Sci. Technol. 18 3682, doi: 10.1088/0957-0233/18/12/002
- [8] Fujii Y. (2006) *Dynamic Calibration Methods for Force Transducers*, XVIII IMEKO world congress: Metrology for a Sustainable Development, 17-22.9.2006, Rio de Janeiro, Brazil
- [9] Esward T.J., Elster C., Hessling J.P. (2009) *Analysis of dynamic measurements: new challenges require new solutions*, XIX IMEKO World Congress: Fundamental and Applied Metrology, 6-11.9.2009, Lisbon, Portugal