

TEHNIČKA MEHANIKA U JUGOTURBINI I NJENIM NASLIJEDNICAMA OD 1949. DO 1992. PA SVE DO 2022.

MIRKO BUTKOVIĆ
BRANISLAV ORČIĆ

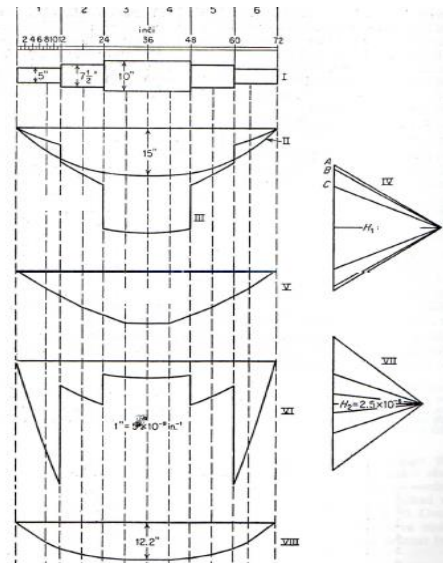
CIGRE, ZAGREB, 2023.

SADRŽAJ

- 1.- STANDARDNI PRORAČUNI: TURBINE, PUMPE, MOTORI
- 2.- IZRAČUNI I MJERENJA MEHANIČKIH VELIČINA
- 3.- KOMERCIJALNI PROGRAMI METODE KONAČNIH ELEMENATA
- 4.- IZRAČUNI ČVRSTOĆE I VIBRACIJA U INFOSYS KARLOVAC
- 5.- AKTIVNOSTI NA MEHANICI U FIRMAMA BIVŠE JUGOTURBINE
- 6.- MEHANIKA NA VIŠOJ TEHNIČKOJ STROJARSKOJ ŠKOLI I
VELEUČILIŠTU U KARLOVCU

1. STANDARDNI PRORAČUNI

- PRORAČUNI ČVRATOĆE PARNIH TURBINA I CENTRIFUGALNIH PUMPI, KUČIŠTA, CJEVOVODA, ROTORA. VLASTITE FREKVENCIE ROTORA. GRAFIČKE METODE
- Slika1 : Primjer grafičke - Stodoline metode izračuna kritične brzine vrtnje



DIESEL MOTORI

- MOTORI SU IMALI SPECIFIČNOST: TORZIONE VIBRACIJE AGREGATA S OSOVINSKIM VODOM (I REDUKTOROM) TE ELEKTROGENERATOROM.

Slika:2 Primjer Holzerove tablice za proračun vlastitih frekvencija

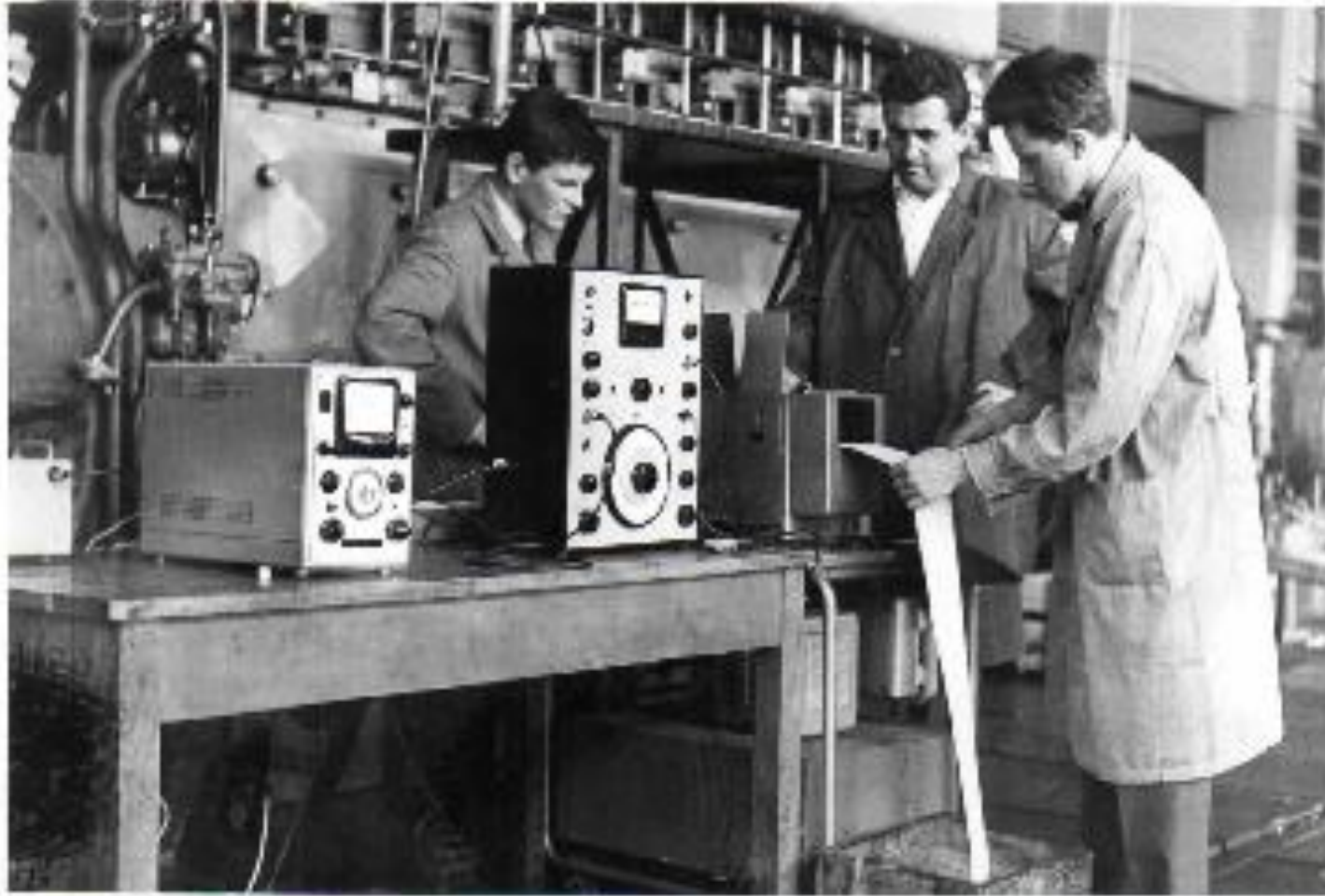
Prva vlastita, prvi pokušaj $\omega^2 = 300000$

No	I (1)	$I\omega^2/10^6$ (2)	β (3)	$I\omega^2\beta/10^6$ (4)	$\Sigma/10^6$ (5)	$k/10^6$ (6)	Σ/k (7)
1	7,94	2,38	1,000	2,38	2,38	36	0,066
2	1,48	0,444	0,934	0,42	2,80	27	0,104
3	1,48	0,444	0,830	0,37	3,17	27	0,118
4	1,48	0,444	0,712	0,32	3,49	27	0,129
5	1,48	0,444	0,583	0,26	3,75	54	0,069
6	17,8	5,34	0,514	2,75	6,50	9,4	0,691
7	105,0	31,5	-0,177	-5,59	+0,91		

2. IZRAČUNI I MJERENJA MEHANIČKIH VELIČINA (IZRADA VLASTITIH KOMPJUTERSKIH PROGRAMA)

2.1. TORZIJSKE VIBRACIJE

- Program izračuna vlastitih torzijskih vibracija i naprezanja uz uvažavanje propisa registarskih društava.
- Prisilne torzijske vibracije s programom optimiranja torzijskih prigušivača i uz uvažavanje propisa registarskih društava
- Mjerenje torzijskih vibracija i naprezanja



- Sl. 3. Mjenje torzijskih vibracija elektroničkom opremom na ispitnoj stanici motora 1973.
- Od lijeva: Vladimir Godek, Zlatko Jeličić i Mirko Butković

PROGRAMI I MJERENJA

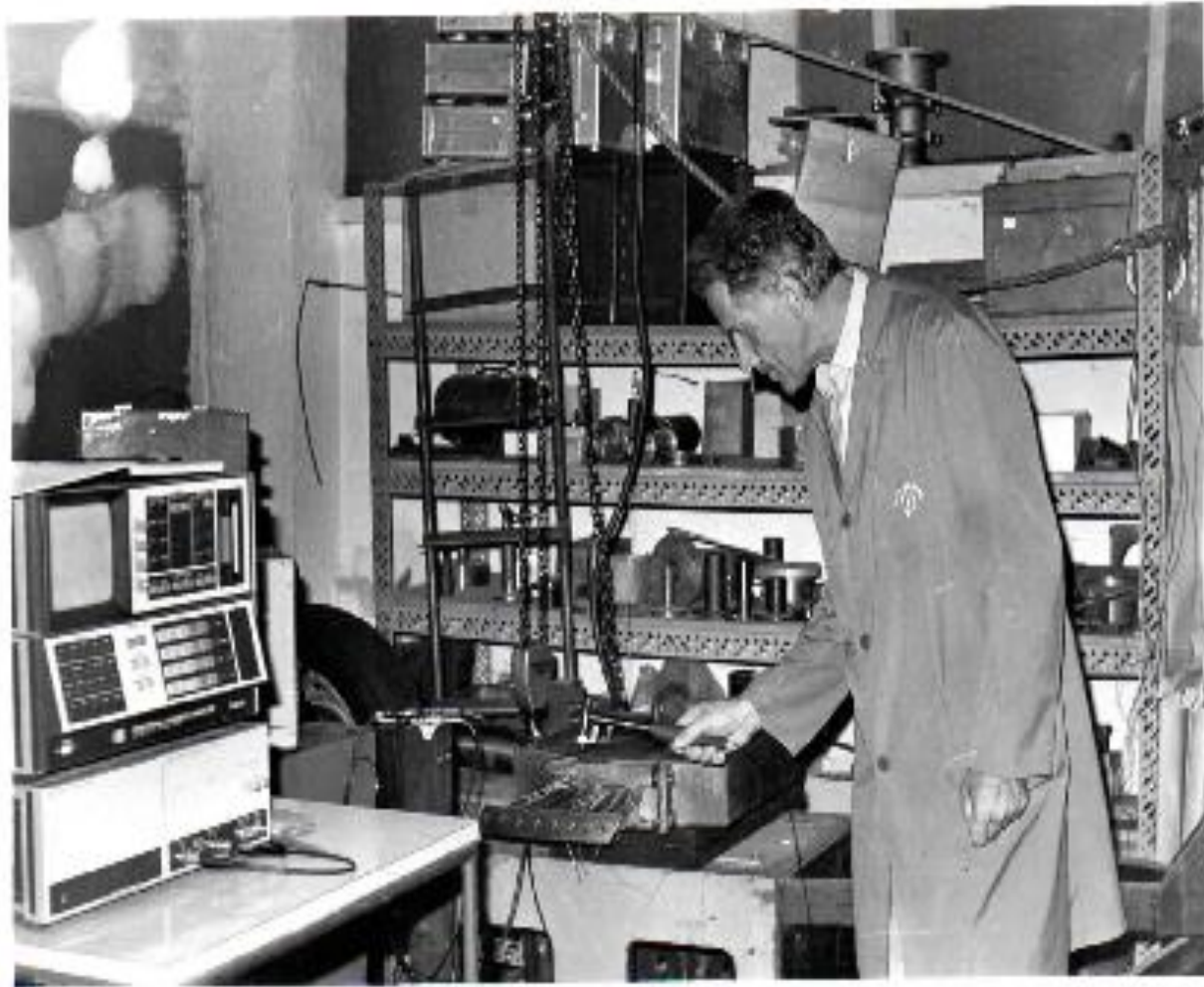
- **2.2. Lateralne vibracije krutog tijela na elastičnim osloncima**
- VLASTITE FREKVENCije, PRISILNE VIBRACIJE, MJERENJE I ANALIZE
- **2.3. Vibracije elastičnog tijela**
- Vlastite frekvencije rotora s utjecajem krutosti ležaja i brtvi
- Prisilne vibracije (Frequency Response) rotora
- Vlastite frekvencije turbinskih lopatica s utjecajem bandaže ili prigušne žice



- Sl.4. Ispitivanje tubinskih lopatica u laboratoriju 1968.
- Na slici Mirko Butković

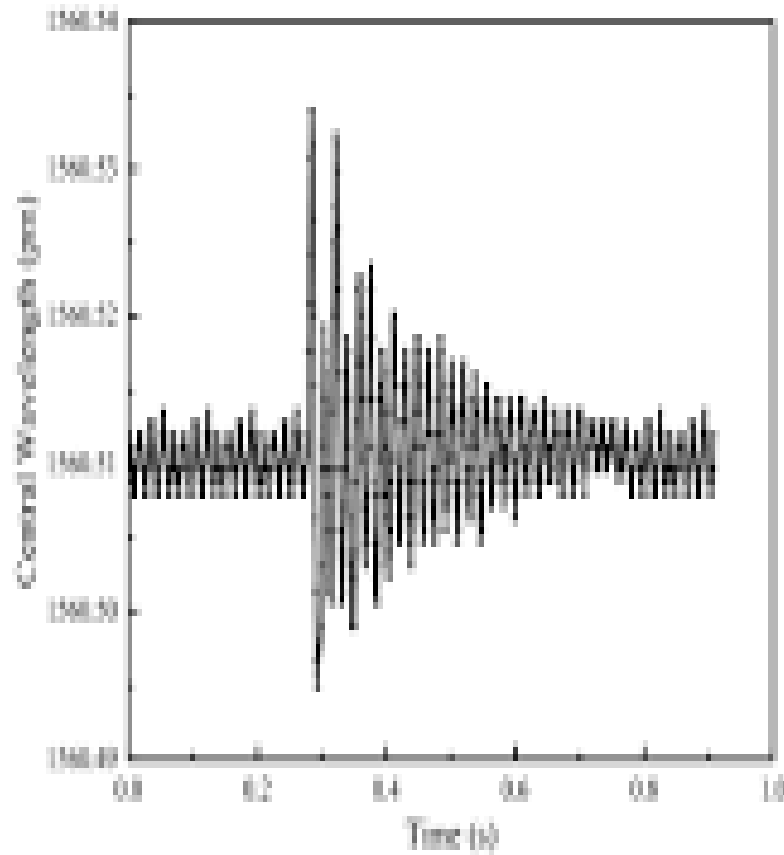


- Sl. 5. Ispitivanje prigušenja lopatica s prigušnom žicom u posebnom laboratoriju 1979. Na slici Anton Fudurić i Mirko Butković

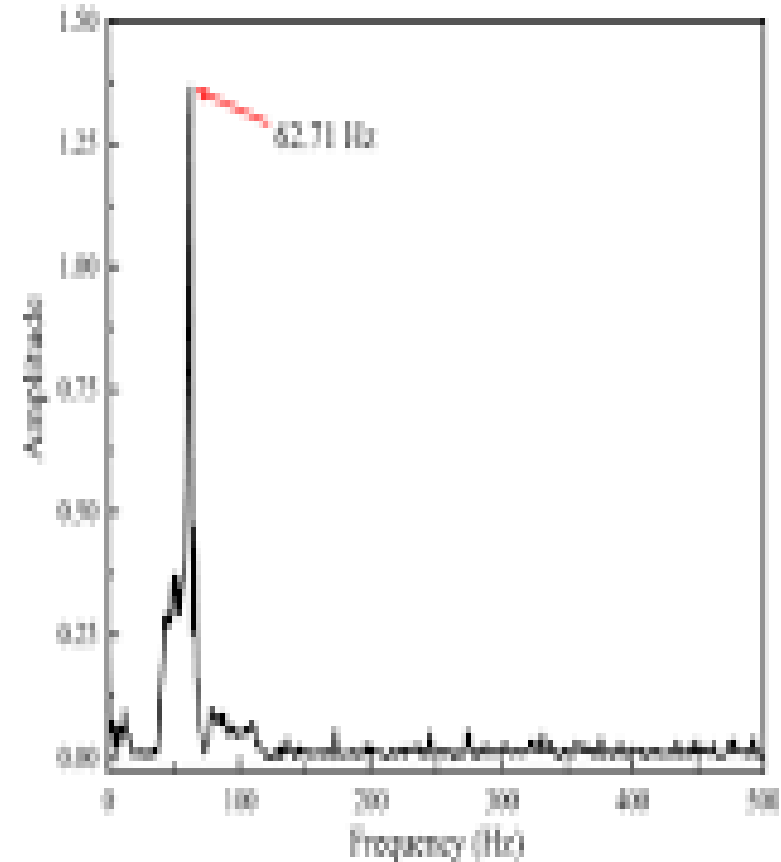


- Sl. 6. Ispitivanje lopatica FFT metodom u laboratoriju 1986.

Sl. 7. Primjer prikaza signala u vremenskom domenu (lijevo), u frekventnu domenu (desno)

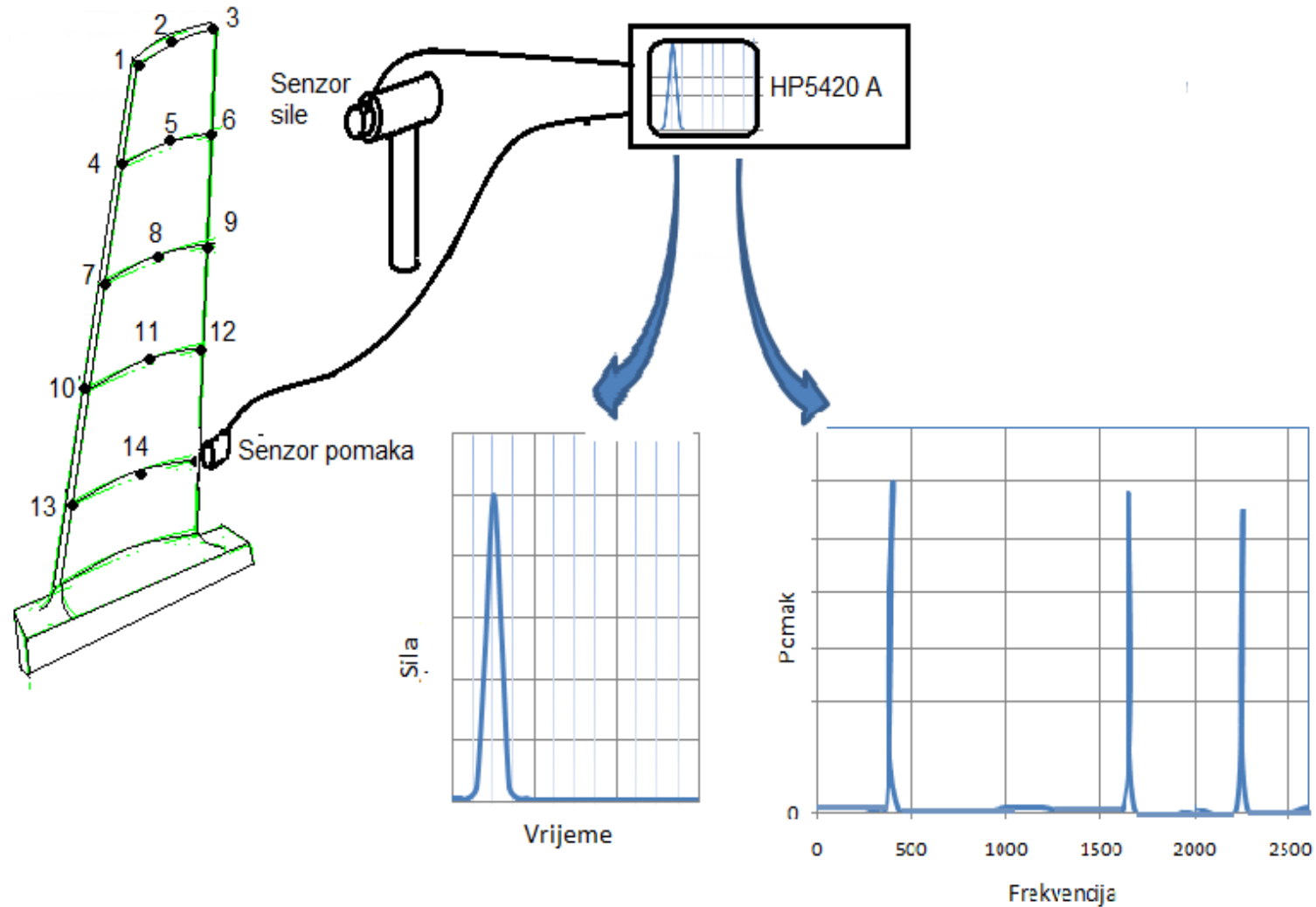


(a) Impulse Time-domain Response of the FBG
Acceleration Sensor

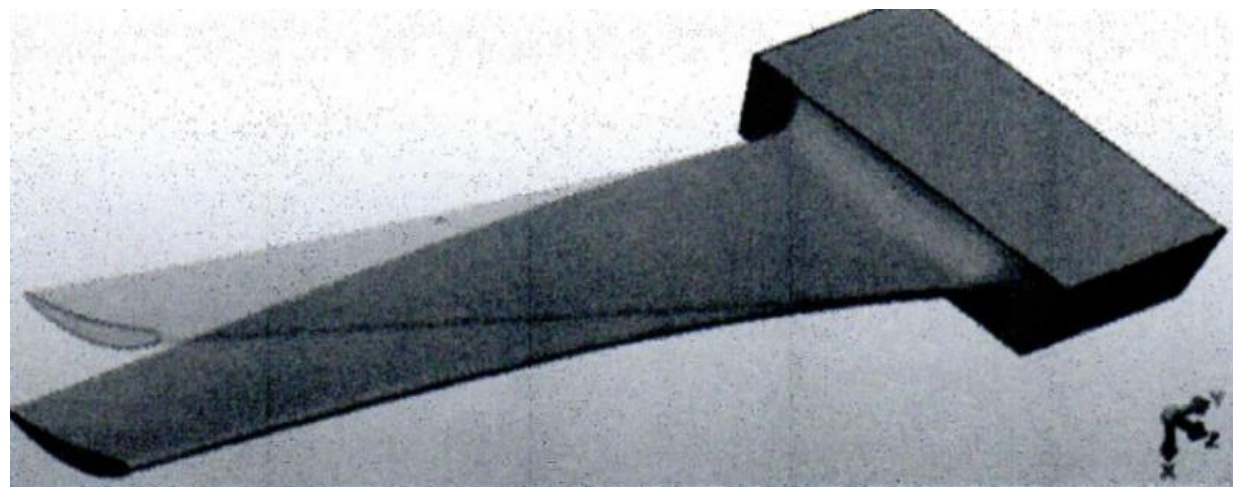


(b) Frequency Spectrum for Impulse Time-domain
Response of the FBG Acceleration Sensor

Sl. 8. Prikaz modalne analize lopatice.

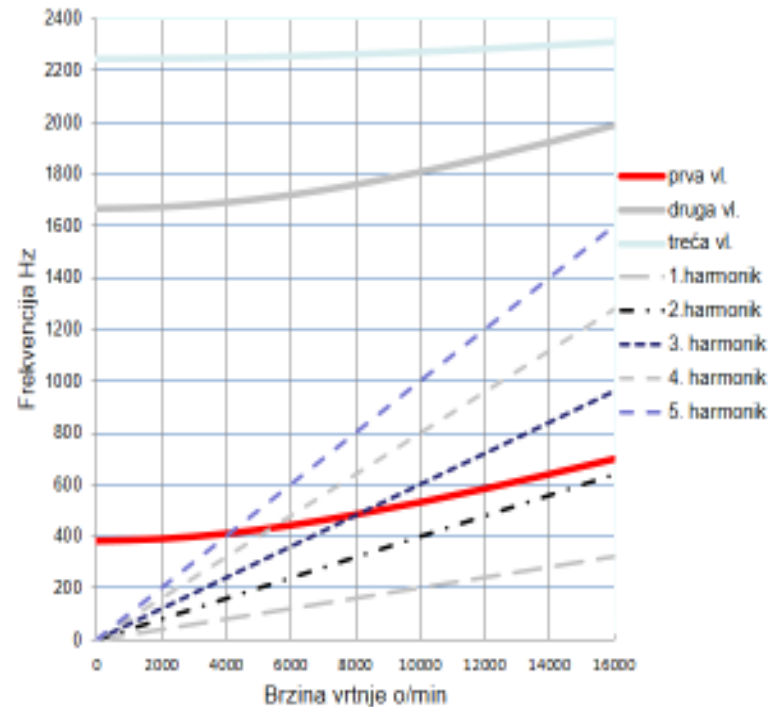


Sl. 9. Prva forma vibriranja dobivena eksperimentanom metodom.



Sl. 10. Campbell dijagram za jedan red lopatica u disku turbine

VLASTITE FREKVENCIJE LOPATICE U ROTACIJI
CAMPBELL DIJAGRAM



Područje brzine vrtnje gdje se može uzбудiti 1.vlastita frekvencija lopatice
s 3. do 5.uzbudnog harmonika

2.4. Balansiranje rotacijskih tijela na gradilištu-pogonu

- **Program**
- Izračunavanje položaja i iznosa utega za balansiranje u više korekcijskih ravnina rotacijskog tijela.
- Mjerenja i analize:

2.5. Izračuni čvrstoće

Interni programi Jugoturbine

- Čvrstoća turbinske lopatice s utjecajem bandaže/prigušne žice
- Čvrstoća turbinskog diska u monobloku ili navučenog na osovinu s određivanjem tolerancije navlačenja
-
- **2.6. Mjerenja tenzometrima**
-
- - Kućišta parnih turbina i pumpi u hladnom stanju
- - Mjerenje momenata u osovinama parnih i vodnih turbina, diesel motora, tijekom rada
- - Mjerenje cikličkih naprezanja lopatica parnih i plinskih turbina
- - Mjerenja naprezanja u raznim nosivim konstrukcijama (Dizalicama, kutijastim nosačima itd..)

2.7. Projektiranje i konstrukcija komponenata strojeva te strojeva za balansiranje i uređaja za nadzor vibracija.

- **Prigušivači torzionih vibracija** . Izvedba s prigušnim oprugama i prigušnim uljem.
- **Elastični elementi** Gumene elemente proizvodila gumara tvornice Josip Kraš Karlovac
- **Zračna turbina** za ispitivanje modela aviona IL 62 u zračnom tunelu
- **Strojevi za balansiranje automobilskih kotača**
- **Horizontalni i specijalni vertikalni strojevi za balansiranje**
- - **Vertikalni strojevi za balansiranje**
- Konstruirano je i proizvedeno oko dvadesetak vertikalnih specijalnih strojeva za balansiranje aksijal-
- nih ventilatora, impelera pumpi, “felgi kamiona” za FAP i TAM.
- - **Horizontalni univerzalni strojevi za balansiranje rotora**
- Izrađeno je oko 45 horizontalnih univerzalnih strojeva za balansiranje rotora raznih vrsta i namjena, i mase rotora od 0.1 kg do 3000 kg.
- Jedan od posljednje izrađenih je specijalni vrhunski stroj za balansiranje kotača vagona za HŽ. Stroj je osim elektronike za mjerenje položaja i iznosa debalansa imao prigradene glodaće glave za strojnu obradu kotača glodanjem. Sve je bilo automatizirano na bazi računala i CNC stroja.
- U to vrijeme Schenck (najpoznatija svjetska firma za izradu strojeva za balansiranje) nije imala takav stroj,

Sl. 11. Razvoj horizontalnog stroja za balansiranje u laboratoriju 1986.



Sl. 12. Horizontalni stroj za balansiranje tip SBH 3000 CNC, firme ENIN Karlovac (slijednica Instituta Jugoturbine) isporučen 1994. Gredelju Zagreb, za automatsko balansiranje vagonskih osovina s kotačima



Uređaji za stalni nadzor vibracija ležaja turbina , pumpi, ventilatora i sličnih strojeva

- **Uređaji za stalni nadzor vibracija ležaja turbina , pumpi, ventilatora i sličnih strojeva**
- Uređaji su izrađivani u dvije varijante.
- - Prva je bila na principu mjerenja vibracija akcelorometrima, koji su kupovani od proizvođača. Istih je izrađeno i isporučeno za pet turboagregata.
- Druga je bila s beskontaktnim mjerenjima osovine na principu vrtložnih struja (eddy current) . Projekt je zaustavljen 1995.

3. KOMERCIJALNI PROGRAMI MKE (metoda konačnih elemenata) korišteni u firmi ALSTOM Karlovac od 1996. do 2017. Korišteni su programi: ANSYS, ABAQUS, ALGOR

- **3.1. Izračuni čvrstoće komponenti parnih turbina s utjecajem tlaka, temperatura u radnom i tranzijentnom opterećenju**
- **3.2. Izračuni preostalog vijeka trajanja komponenti parnih turbina**
- **3.3. Izračuni čvrstoće komponenti plinskih turbina u radnom i tranzijentnom opterećenju za servisni dio**
- **3.4. Izračuni strujanja, prijelaza topline, čvrstoće (linearna i nelinearna analiza), vibracija i vijeka trajanja (LCF= niskociklički zamor: HCF=visokociklički zamor; oksidacija toplinskih izolatora) (komponenti plinskih turbina u radnom i tranzijentnom opterećenju za razvojni i servisni dio odjela plinskih turbina**
- **3.5. Cjevovodi oko plinskog turbobloka i termoelektrane za parni dio i rashladnu vodu u kondenzatoru**

4. Izračuni čvrstoće i vibracija u INFOSYS Karlovac od 2017. do 2022.

Programi: ANSYS, ABAQUS, Simufact, Cezar, Rohr2...

Izračuni strujanja, prijelaza topline, čvrstoće i vijeka trajanja komponenti plinskih turbina i avio motora u radnom i tranzijentnom opterećenju:

- - Komore izgaranja za VT i NT dio plinske turbine
- - Plamenici (breneri) s utjecajima hlađenja
- - Sustavi za testiranje plinske turbine
- - Čvrstoća turbinskog rotora
- - Kompresorske i turbinske lopatice
- - Kućišta
- - Toplinski štitovi
- - Sustavi za dovod goriva
- - Sustavi za ispitivanje avionskih motora
- - Pomoćni sustavi
- - Cjevovodi oko turbobloka i termoelektreane za parni dio i rashladnu vodu u kondenzatoru

5. Aktivnosti na mehanici u ostalim firmama u Karlovcu nastalih raspadom Jugoturbine od 1992. do 2022

- **5.1. Turboteh Karlovac.** Osnovan je 1992. a bavio se remontom turbina i pumpa. Imao je opremu za mjerenje vibracija i balansiranje ali mehaničke proračune nije radio. Godine 2007. kupio ga je ALSTOM Karlovac
- **5.2. Dinamika d.o.o.** Karlovac. Firma se bavi mjerenjem i analizom vibracija i proizvodnjom i remontom strojeva za balansiranje, što obuhvaća i teoretsko znanje o balansiranju krutih i elastičnih rotora. Rade i proračune vlastitih frekvencija fleksijskih i torzijskih vibracija. Osnovana je 1992. i sada je aktivna.
- **5.3. Tvornica turbina Karlovac.** Bavi se konstrukcijom i proizvodnjom parnih turbina, pumpa i drugih strojeva i uređaja.. Osnovana 1992. i sada je aktivna. U tvrtki se u procesima remonata i dizajna novih tipova primjenjuju standardni provjereni izračuni i analize čvrstoće komponenata i analize iz područja vibracija (Kritične brzine vrtnje rotora). U suradnji s Tehničkim fakultetom Rijeka provjerava se stabilnost uljnog filma kliznih ležajeva, za turbine s većom brzinom vrtnje od 10000 min^{-1} Metoda konačnih elemenata se primjenjuje za izračune čvrstoće u područjima elastičnog i elastoplastičnog područja materijala osobito kritičnih elemenata (turbinske lopatice, turbinske rotore i ventilska kućišta), u analizama vibracija sklopova (kao ležajni blokovi, cjevovodi oko turbine, itd).
- **5.4. Tvornica plinskih turbina Karlovac**
- Tvornica je bila dio Jugoturbine, ali od 1992. nastavlja poslovati kao privatna firma u stranom vlasništvu. Proizvodi komponente plinskih turbina i zračnih kompresora za avionasku industriju i petrokemiju. Proizvodi lopatice od aluminijskih legura, legiranih čelika i niklovih legura. Povremeno se ispituje ciklička čvrstoća, te se kod toga provode proračuni, mjerenja i statističke analize.

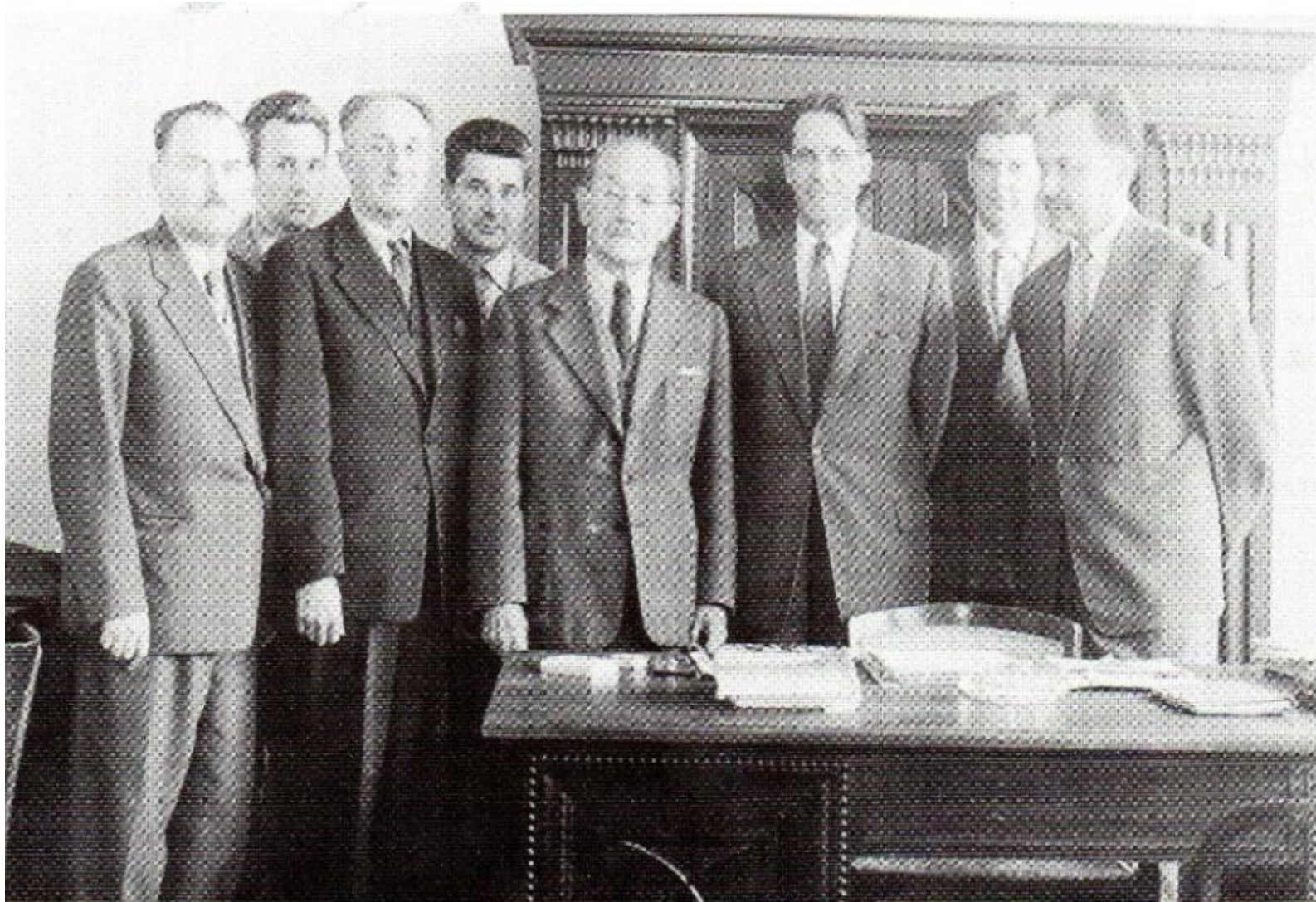
6. Nastava mehanike na Višoj tehničkoj strojarskoj školi Karlovac od 1960. do 1997. te na Veleučilištu Karlovac od 1997. do 2022.

- VTSŠ je osnovan 1960. od strane poduzeća Jugoturbine, Korduna i Žeče-a. Jugoturbina je davala većinu financija i gotovo 100% nastavnika.
- Godine 1997. osnovano je Veleučilište sa stručnim studijima, a 2004. osnovan je specijalistički diplomski studij strojarstva. Tada su uvedeni predmeti: mehanički integritet strojeva, vibracije, dinamika strojeva i konačni elementi.

Zaključak

- Ovdje je prikazan dio rada na mehanici čvrstih tijela, koji je razgranat na statički i dinamički dio, gdje dinamika i vibracije igraju ključnu ulogu kod strojeva.
- Nabrojeni su mnogi stručnjaci koji su izrasli na radu u Jugoturbini, ali moramo navesti dvije ključne figure koje su zaslužne da su jugoturbinski stručnjaci brzo i temeljito savladali problematiku. To je: **prof. Ernest Kraft (AEG)** koji je dao cijelu koncepciju prve parne turbine (i grafičkog proračuna kritičkih brzina).
- **prof. Anton Vučetić (FSB)**, koji je radio kao savjetnik za proračun i mjerenje torzionih vibracija diesel motora.
- Kasnije je prof. **Alfred Nordmann** imao velikog utjecaja na razvoj mehanike u Jugoturbini i na Tehničkom fakultetu u Rijeci, naročito na elastičnosti ležajeva i u osnivanju mehatronike na VUKu
- Tri stručnjaka zaposlena u Jugoturbini i Veleučilištu u Karlovcu imali su najveći utjecaj na razvoj mehanike i to: **Mirko Butković, Branislav Orčić i Ivan Škrtić**
-

Prof. Kraft sa suradnicima na odlasku 1954. (s lijeva: S. Srb, V. Damaška, A. Ošlag, Z. Štimac, **Ernest Kraft** (peti s lijeva), H. Gazin, V. Slapničar, M. Majcen)



Prof. Anton Vučetić (1976.)



Prof. Alfred Nordmann i Butković na Tehničkom
univerzitetu u Darmstadt-u 2000. god



Mr. Ivan Škrtić i mr. Branislav Orčić, 1976.(Prvi i treći slijeva)



KRAJ