



**BUKA I VIBRACIJE
NOISE AND VIBRATION**



Dragan S. Cvetković

- autor -

Momir R. Praščević

- koautor -

**The publishing of this book was financed by Austrian Cooperation through
WUS Austria within the CDP+ 105/2004 project**

**Objavlivanje ovog udžbenika omogućili su Austrian Cooperation i
WUS Austria u okviru projekta CDP+ 105/2004**

this copy is not for sale
besplatan primerak

**Univerzitet u Nišu
Fakultet zaštite na radu
2005.**

Prof. dr Dragan Cvetković, dipl. ing.
Doc. dr Momir Praščević, dipl. ing.

BUKA I VIBRACIJE

Prvo izdanje 2005. godine

Na osnovu odluke Naučno - nastavnog veća Fakulteta zaštite na radu u Nišu br. 03-639/5 od 8.12.2005. rukopis je odobren za štampu kao osnovni udžbenik.

Izdavač:

Fakultet zaštite na radu u Nišu
Niš, Čarnojevića 10a

Za izdavača:

Prof. dr Dragan Spasić, dekan Fakulteta zaštite na radu u Nišu

Recenzenti:

Prof. Dr Petar Pravica, red. prof. Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, u penziji

Prof. dr Nikola Lilić, red. prof. Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu

Tehnički urednik: autor

Dizajn korice:

Avramović Design - AvramovicDesign.com

Štampa:

Unigraf - Niš

Tiraž: 100

ISBN: 86-80261-45-9



SADRŽAJ

VIBRACIJE

1	Pojam vibracija	1
1.1	Osnovni pojmovi	5
1.2	Vibracije - terminologija	5
1.3	Oscilatorna kretanja	8
1.3.1	Vibracije i potresi	8
1.3.2	Osnovne veličine u teoriji vibracija	8
1.3.3	Klasifikacija vibracionih sistema i procesa	9
2	Kinematika vibracija	11
2.1	Pravolinijsko harmonijsko oscilovanje	13
2.1.1	Harmonijsko oscilovanje	13
2.1.2	Slaganje ortogonalnih oscilacija	13
2.2	Slaganje kolinearnih oscilacija	15
	Zadaci	17
3	Dinamika vibracija	21
3.1	Sistemi sa jednim stepenom slobode	23
3.1.1	Sistemi slobode	23
3.1.2	Slobodne vibracije	23
3.1.3	Sprezanje opruga	25
3.1.4	Slobodne vibracije sa viskoznom prigušenjem	26
3.1.5	Prinudne vibracije	28
3.1.6	Principi zaštite od vibracija	34

3.2	Sistemi sa dva stepena slobode	37
3.2.1	Slobodne vibracije	37
3.2.2	Nepriugušen dinamički amortizer vibracija	39
3.2.3	Izolacija temelja koji nisu kruti	41
	Zadaci	43
4	Vibracije i ljudsko telo	47
4.1	Vibracione bolesti	49
4.2	Oscilatorno ponašanje ljudskog tela	51
4.3	Procena uticaja vibracija na organizam	55
4.3.1	Metoda odnosa	55
4.3.2	Metoda merenja	55
4.4	Vibracije sistema šaka-ruka	56
4.5	Izbor parametra za ocenjivanje	58
4.5.1	Karakteristike vibracija – RMS	58
4.6	Procena uticaja vibracija sistema šaka-ruka	59
	BUKA	
5	Fizički koncept zvuka	61
5.1	Fenomen zvuka i zvučnih talasa	65
5.1.1	Fizički koncept zvuka	65
5.1.2	Definicija zvuka i buke	66
5.1.3	Nastajanje zvuka	67
5.1.4	Prostiranje zvuka	70
5.1.5	Karakteristične veličine zvučnog talasa	72
5.1.6	Pojave koje prate prostiranje talasa	75
5.2	Talasna jednačina	81
5.2.1	Jednačina kretanja	81
5.2.2	Jednačina kontinuiteta	83
5.2.3	Gasni zakon	84
5.2.4	Izvođenje talasne jednačine	85
5.3	Oblici zvučnih talasa	86
5.3.1	Ravni talasi	86
5.3.2	Sferni talasi	88

5.4	Energetske veličine	90
5.4.1	Energija zvuka i gustina energije	90
5.4.2	Intenzitet zvuka	92
5.4.3	Zvučna snaga	93
5.5	Tačkasti izvor zvuka	95
5.5.1	Model tačkastog izvora zvuka	95
5.5.2	Izvori sa usmerenim zračenjem	96
5.5.3	Prostorni ugao zračenja	97
5.5.4	Zajedničko dejstvo nezavisnih izvora	98
5.5.5	Zvučni izvor pored zida	100
	Test pitanja	102
	Zadaci	110
6	Subjektivni fenomeni percepcije zvuka	123
6.1	Subjektivni fenomeni percepcije zvuka	127
6.1.1	Veberov zakon	128
6.1.2	Fehnerov zakon	128
6.1.3	Adrianov zakon	129
6.2	Građa i funkcija organa sluha	129
6.2.1	Spoljašnje uvo	130
6.2.2	Srednje uvo	131
6.2.3	Unutrašnje uvo	132
6.3	Prenošenje zvuka	133
6.3.1	Frekvencijska dekompozicija zvučnog signala na bazilarnoj membrani	134
6.3.2	Prenos i obrada zvučnih informacija	135
6.4	Frekvencijsko-dinamički opseg čujnosti	136
6.4.1	Frekvencijski opseg	136
6.4.2	Dinamički opseg čujnosti	137
6.5	Nivo zvuka - buke	137
6.5.1	Razlozi za uvođenje pojma nivoa zvuka	137
6.5.2	Definicija nivoa zvuka	138
6.5.3	Konverzija nivoa zvuka	140
6.5.4	Sabiranje nivoa složenog zvuka	141
6.5.5	Oduzimanje nivoa složenog zvuka	143

6.6	Subjektivna jačina zvuka	144
6.7	Glasnost zvuka	145
6.8	Subjektivna jačina složenog zvuka	146
6.8.1	Složeni zvuk sa komponentama vrlo različitih frekvencija	146
6.8.2	Složeni zvuk vrlo uskog spektra	147
6.8.3	Složeni zvuk širokog spektra	147
6.9	Težinske krive	148
6.10	Energetske fiziološke veličine	150
6.10.1	Ekvivalentni nivo	150
6.10.2	Nivo izloženosti zvuku (buci) – SEL	152
	Test pitanja	154
	Zadaci	158
7	Merenje buke i vibracija	169
7.1	Tipovi buke	173
7.2	Merni lanac	175
7.2.1	Kondenzatorski mikrofoni	175
7.2.2	Detektor signala	179
7.3	Frekvencijska analiza	181
7.3.1	Pojasna frekvencijska analiza	183
7.3.2	Oktavni i terčni filtri	185
7.3.3	Metode frekvencijske analize	187
7.4	Merenje intenziteta zvuka	188
7.4.1	Aproksimacija konačnom razlikom	188
7.4.2	Primena intenziteta zvuka	189
7.5	Izbor mernih mesta	192
7.6	Instrumenti za merenje buke	194
7.6.1	Modularni precizni analizator buke - Investigator	194
7.6.2	Priprema instrumenta za merenje	195
7.6.3	Procedura merenja	196
7.7	Merenje i analiza vibracija	199
7.7.1	Parametri vibracija	200
7.7.2	Pretvarači vibracija	200
7.7.3	Detektor i usrednjivač	204
7.7.4	Linearne i logaritamske skale	204

Test pitanja	206
Zadaci	210
8 Buka u zatvorenom prostoru	217
8.1 Zvučni talasi u zatvorenom prostoru	221
8.1.1 Sopstvene frekvencije ograničenog prostora	222
8.1.2 Modeliranje zatvorenog prostora velikih dimenzija	225
8.1.3 Koeficijent apsorpcije	226
8.2 Analiza zvučnog polja pomoću statističke teorije	228
8.2.1 Proces nastajanja zvučnog polja	229
8.2.2 Vreme reverberacije	231
8.2.3 Prostorije sa velikim koeficijentom apsorpcije	234
8.3 Akustička obrada prostorija	235
8.3.1 Smanjenje nivoa buke	236
8.3.2 Akustički materijali	238
8.4 Izolacija zvuka	243
8.4.1 Izolaciona moć pregrade	244
8.4.2 Zvučna izolacija prostorija	245
8.5 Izolaciona moć jednostruke pregrade	246
8.5.1 Zakon mase	246
8.5.2 Idealizovana kriva izolacione moći jednostruke pregrade	248
8.5.3 Aproksimativna kriva izolacione moći jednostruke pregrade - proračun	249
8.5.4 Izražavanje izolacione moći jednim brojem	250
Test pitanja	253
Zadaci	257
9 Prilozi	269
10 Literatura	287



PREDGOVOR

Buka i vibracije su fenomeni koji se na Fakultetu zaštite na radu izučavaju sa ciljem da se studenti osposobe za prepoznavanje fenomena vibracionih i akustičkih procesa u inženjerskoj praksi i ovladaju veštinama za dijagnostiku, metrologiju i upravljanje rizikom koji ti procesi generišu pri radu. Strukturiranje programskog sadržaja ostvareno je nakon višegodišnjeg rada sa studentima i rešavanjem praktičnih problema koje je praksi zaštite na radu nametala tehnološka realnost.

Obzirom na činjenicu da generisanje fenomena buke i vibracija ima mehaničku prirodu, nastavna materija je u uvodnom pledojauu strukturirana u dva dela. Prvi deo obuhvata mehaničke, a drugi deo zvučne oscilacije.

Vibracije kao problem u inženjerskoj praksi je suština koja se razrađuje u prvom poglavlju. Autori objašnjavaju osnovne pojmove vezane za vibracije, koristeći se terminima koji su definisani međunarodnim standardima.

Fizičke veličine za opisivanje vibracionog signala su predstavljene kroz profil kinematike vibracija u drugom poglavlju, opisivanjem i vektorskim predstavljanjem prostih i složenih harmonijskih oscilacija. Autori se u ovom kao i u drugim poglavljima trude da što jednostavnije, na pragmatičan način, predstavite materiju. Matematički aparat nije izbegavan, ali je u svakoj prilici korišćen što jednostavniji model.

U trećem poglavlju se tretiraju problemi vibracija kod sistema sa jednim stepenom slobode kretanja, definisanjem mehaničkih parametra – sistema sa kombinacijom elemenata masa – opruga - prigušivač u uslovima slobodnog i prinudnog oscilovanja. Namera autora je da stvori platformu za usvajanjem znanja koje će kod mnogih izvora (mašina i konstrukcija) objasniti pojavu rezonancije, omogućiti izračunavanje sopstvene frekvencije i objasniti problem oslanjanja i izolovanja vibracija. Na taj način ostvorena je pretpostavka za upoznavanje vrste signala karakteristične veličine vibracije.

Pored toga tretiraju se sistemi sa više stepeni slobode, kao realni sistemi koje praksa zaštite na radu prepoznaje. Međutim, imperativ u razmatranju su sistemi sa dva stepena slobode kretanja, koji realno u generalisanom sistemu predstavljaju položaj rukovaoca u odnosu na oscilujuću masu konstrukcije. Poseban značaj se posvećuje dinamičkim apsorberima, svođenjem problema na jednostavniji analitički pristup definisanja karakterističnih frekvencija oscilovanja.

Po svom sadržaju četvrto poglavlje objedinjuje stečene informacije u procesu ocene stanja i implamentaciju standarda za opšte "humane" vibracije, vibracije sistema šaka-ruka i dijagnostičke procedure za ocenu stanja tehnološke opreme radi održavanja, definisanja rizika i upravljanja označenim procesima.

U petom poglavlju se ukratko opisuju fizičke osobine zvuka i buke kao neželjenog zvuka. Osnovna teorija se proširuje diskusijom matematičkog alata za izvođenje i rešavanje talasne jednačine. Date su osnovne jednačine za zvučni pritisak i intenzitet zvuka u zavisnosti od rastojanja do izvora. Korišćenjem termalne analogije objašnjava se razlika između zvučnog pritiska i zvučne snage.

U šestom poglavlju se razmatraju subjektivni fenomeni percepcije zvuka, počev od mehanizma sluha do frekvencijsko-dinamičkog opsega čujnosti ljudskog uha. U drugom delu poglavlje se uvode osnovne veličine i jedinice za opisivanje jačinebuke.

Sedmo poglavlje opisuje instrumente za merenje buke i vibracija i opšte tehnike za merenje i analizu, počev od jednostavnih mernih sistema sa filtarskim jedinicama (oktavnim, tercnim i uskopojasnim), pa do složenijih instrumenata i sistema za analizu. Opisani su osnovni elementi mernog sistema sa njihovim glavnim osobinama. Naglašena je neophodnost pažljive kalibracije i u kratkim crtama su opisane procedure koje dovode do najpreciznijih mernih rezultata.

U osmom poglavlju se objašnjava ponašanje zvuka u zatvorenom prostoru primenom talasne i statističke teorije. Prikazana analiza zvuka u prostorijama ne uključuje samo objašnjenja reflektovanja zvuka u prostoriji, već i kakav efekat imaju različiti materijali pri apsorciji i kontroli buke u prostoriji. Kao metode za kontrolu buke, posebno se naglašavaju akustička obrada prostorija i zvučna izolacija.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju *Austran Cooperation* i *WUS Austria* koji su kroz finansijsku podršku projekta CDP+ 105/2004 omogućili inovaciju nastavnog plana i programa predmeta *Buka i vibracije* i objavljivanje ovog udžbenika.

Autori se takođe zahvaljuju recenzentima dr Petru Pravici, redovnom profesoru Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu i dr Nikoli Liliću, redovnom profesoru Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu, na korisnim sugestijama i uloženom trudu oko recenzije ovog udžbenika.



PREFACE

Noise and vibration are phenomena studied at the Faculty of Occupational Safety in order to train students to recognize the phenomena of vibrational and acoustical processes in engineering practice and to get skills in diagnostics, metrology and risk management.

The content of this book has been structured after a long work with students and solving the practical problems in the occupational safety practice. As the noise and vibration generation has mechanical nature, the book subject matter is divided in two parts. The first part describes mechanical oscillations while the second describes acoustical oscillations.

Chapter 1 deals with fundamental concepts of vibration as the problem in engineering practice, using the terms from the international standards.

In the chapter 2, the physical quantities used for describing vibration signal are presented based on the vibration kinematics by describing and vector presentation of the simple and complex harmonically oscillations. The explanations in this chapter, as in others, are not restricted to mathematical formulas but also use many practical and experimental examples. Mathematical results, physical and practical explanations go hand in hand.

Chapter 3 presents the theory of free and forced steady-state vibration of single degree-of-freedom systems. Undamped systems and systems having viscous damping and structural damping are included. The resonance phenomenon, the natural frequency calculation and the basic principles of foundation and vibration isolation are all explained. The multiple degree-of-freedom systems are discussed as the real systems with emphasis to two degree-of-freedom systems. Two degree-of-freedom systems represent an operator position regarding oscillating mass of construction. Special attention is given to the dynamic absorbers by defining the characteristic oscillation frequencies therefore simplifying the problem.

The chapter 4 summarizes the most important effects of vibration on man including the effect on comfort, performance and health. The hand-arm and whole body vibration are discussed with review of international standards, limits and criteria. In this chapter the diagnostically procedures for estimation of technological equipment condition are included. The aim of the preventive maintenance and condition-based maintenance is explained.

Chapter 5 briefly describes the physical properties of sound and noise as unwanted sound. The basic theory is expanded by the discussion about the mathematical tool for deriving and solving wave equation. The basic equation for sound pressure and sound intensity in relation to distance from source are given. The difference between sound pressure and sound power is explained by using the thermal analogy.

Chapter 6 deals with psychoacoustics matters, beginning with the mechanism of hearing, and going on to masking, the perception of noise and the adverse noise effects on human beings. The subjective effects of noise are then dealt with and the most common measurement units currently in use are defined and their development and areas of application described.

Chapter 7 describes noise and vibration measurement instrumentation and general measurement and analysis technique, beginning with the simple measuring system and filter sets (octave, third-octave and narrow band) and progressing through more comprehensive instruments to analysis system. The basic elements of measuring system and the main specifications are described. The necessity for careful calibration of the set-up is stressed and procedures are outlined which should produce the best possible measurement.

In chapter 8, the behavior of sound within rooms and enclosures is examined using the wave and statistical theory. The shown analysis of sound in rooms involves not only a search how sounds are reflected backward and forward in a room but also investigations into how the effect various materials have in absorbing and controlling noise in the room. Attention will be also focused on sound insulation and acoustical treatment as the main noise control methods.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the *Austrian Cooperation* and *WUS Austria* that made possible the curriculum innovation of subject *Environmental Noise* and publishing of this book, within a financial support of the CDP+ 105/2004 project.

Also, the authors would like to thank the reviewers - Petar Pravica PhD, full professor at the Faculty of Electrical Engineering in Belgrade and Nikola Lilić PhD, full professor at the Faculty of Mining and Geology in Belgrade, for useful suggestions and time investment in preparation of peer review of this book.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

534.83(075.8)

ЦВЕТКОВИЋ, Драган

Buka i vibracije = Noise and Vibration /
Dragan Cvetković, Momir Praščević. - 1.
izd. - Niš : Fakultet zaštite na radu, 2005
(Niš : Unigraf). - VI, 293 str. : graf.
prikazi, tabele ; 25cm

Na nasl. str. : Univerzitet u Nišu. - Tekst
štampan dvostubačno. - Tiraž 100. -
Bibliografija : str. 289-293.

ISBN 86-80261-45-9

1. Прашчевић, Момир

а) Бука б) Вибрације

COBISS.SR-ID 127576332