

## BRODSKI DOJAVNI ZVUKOVOD

Siniša Fajt,  
suradnik Akademije tehničkih znanosti Hrvatske,  
Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu,  
[sinisa.fajt@fer.hr](mailto:sinisa.fajt@fer.hr)  
Bojan Ivančević,  
Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu,  
[bojan.ivancevic@fer.hr](mailto:bojan.ivancevic@fer.hr)

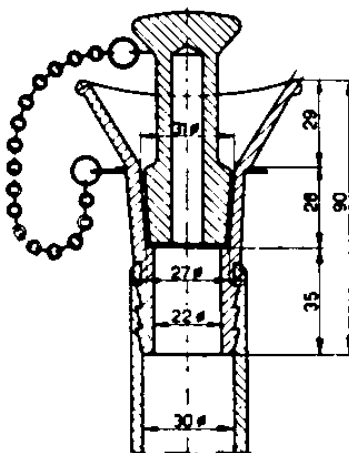
**Sažetak:** Visoka pouzdanost brodskog dojavnog zvukovoda uvjetuje njegovu obaveznu primjenu poglavito na brodovima posebne namjene. U radu je provedena analiza akustičkih svojstava standardnog dojavnog zvukovoda. Teoretska razmatranja simulirana su računalom.

### 1. Uvod

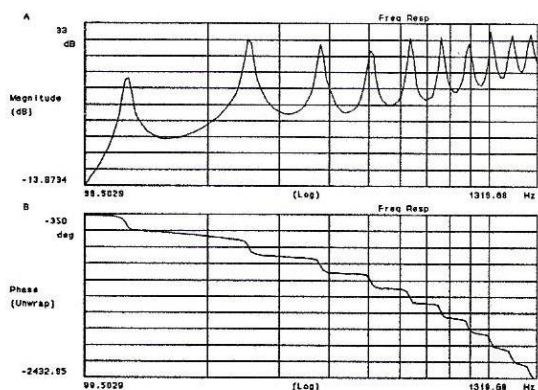
Usprkos postojanju suvremenih sredstava veze kao što su radio veza i telefonska veza, na brodovima posebne namjene (posebito na vojnim brodovima) zadržava se komunikacija dojavnim zvukovodom. Zadržavanje kao opcije, dojavnog zvukovoda posljedica je njegove neovisnosti o napajanju energijom, neosjetljivosti na elektromagnetska zračenja (uslijed ometanja i atomskog udara), jednostavnosti i brzine pri rukovanju. Objašnjenje pouzdanosti dojavnog zvukovoda slijedi iz analize karakteristika izmjerenih u laboratorijskim uvjetima i simuliranih računalom. Mjerenja su provedena na modelima koji su imali duljine primjerene za mjerenje u gluhoj komori Elektrotehničkog fakulteta u Zagrebu i korištena su u praksi pri projektiranju zvukovoda. Izmjerene karakteristike uspoređivane su sa simuliranim karakteristikama na računalu korištenjem PSPICE programske podrške. Nakon usporedbe stvarnih i simuliranih karakteristika izvršena je simulacija zvukovoda većih duljina da bi se utvrdilo kako utječe promjena duljine zvukovoda na njegove karakteristike.

### 2. Opis inovacije - usporedba mjerenih i simuliranih karakteristika brodskog dojavnog zvukovoda

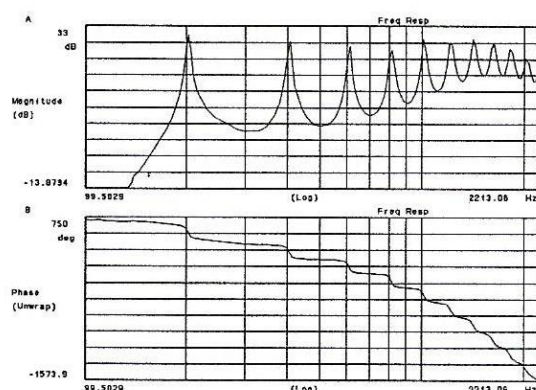
Uzorci na kojima su provedena mjerenja odabrani su tako da približno odgovaraju stvarnim karakteristikama brodskog dojavnog zvukovoda. Izgled sa stvarnim mjerama brodskog dojavnog zvukovoda prikazane su na slici 1. Kod mjerenja u laboratorijskim uvjetima bilo je ograničenje duljine cijevi. Prilikom mjerenja provedeno je akustičko odvajanje prijemne i odašiljačke strane tako da je omogućeno registriranje zvuka koji se širio samo kroz zvukovod. Kod odabira uzoraka vodilo se računa o promjeru cijevi i vrsti materijala koji su od praktične vrijednosti za primjenu u stvarnim uvjetima. Izmjerene amplitudne i fazne frekvencijske karakteristike prikazane su na slici 2. i 3. U tablici 1. dane su vrijednosti 10 prvih frekvencija rezonantnih uzvišenja očitanih na izmjerenoj amplitudnoj frekvencijskoj karakteristici.



Sl. 1 Izgled brodskog dojavnog zvukovoda



Sl. 2 Izmjerena amplitudna i fazna frekvencijska karakteristika  $l = 1.33 \text{ m}$   $2r = 0.029 \text{ m}$



Sl. 3 Izmjerena amplitudna i fazna frekvencijska karakteristika  $l = 0.81 \text{ m}$   $2r = 0.041 \text{ m}$

Tab. 1: Očitane vrijednosti frekvencija rezonantnih uzvišenja iz izmjerenih frekvencijskih karakteristika

$l$ [m]	$2r$ [m]	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$f_4$ [Hz]	$f_5$ [Hz]	$f_6$ [Hz]	$f_7$ [Hz]	$f_8$ [Hz]	$f_9$ [Hz]	$f_{10}$ [Hz]
1.33	0.029	127.711	251.440	378.885	503.946	635.381	759.376	891.533	1010.030	1144.270	1273.450
0.81	0.041	203.015	406.890	613.125	815.504	1010.030	1207.140	1417.220	1634.460	1818.980	2024.340

U tablici 2. prikazan je proračun parametara zvukovoda za duljine uzoraka i veće duljine da bi se vidjelo ponašanje zvukovoda u ovisnosti o povećanju duljine.

Tab. 2: Proračunati parametri zvukovoda

$l$ [m]	1.33	0.816	10	10	20	20
$2r$ [m]	0.029	0.041	0.029	0.041	0.029	0.041
$L_a$	2442.457	749.711	18.364.340	9.187.631	36.728.680	18.375.260
$C_a$	6,18E-03	7,58E-03	4,65E-02	9,29E-02	9.300251-8	1,86E+13
$Z_a$	628427.8	314400.8	628427.8	314400.8	628427.8	314400.8
$t_d$ [s]	3,89E+03	2,38E+02	2,92E+04	2,92E+04	5,84E+04	5,84E+04
$f_1$	128.647	209.681	17.110	17.110	8.555	8.555
$f_2$	257.293	419.363	34.220	34.220	17.110	17.110
$f_3$	385.940	629.044	51.330	51.330	25.665	25.665
$f_4$	514.587	838.726	68.440	68.440	34.220	34.220
$f_5$	643.233	1.048.407	85.550	85.550	42.775	42.775
$f_6$	771.880	1.258.088	102.660	102.660	51.330	51.330
$f_7$	900.526	1.467.770	119.770	119.770	59.885	59.885
$f_8$	1.029.173	1.677.451	136.880	136.880	68.440	68.440
$f_9$	1.157.820	1.887.132	153.990	153.990	76.995	76.995
$f_{10}$	1.286.466	2.096.814	171.100	171.100	85.550	85.550

Frekvencije rezonantnih izdizanja računane su prema izrazu za proračun rezonantnih frekvencija cijevi otvorene s oba kraja:

$$f_n = n \cdot \frac{c}{2 \cdot l} \quad (1)$$

Akustički induktivitet definiran je kao:

$$L_a = \rho_0 \cdot \frac{l}{A} \quad \text{kg/m}^4 \quad (2)$$

Akustički kapacitet definiran je kao:

$$C_a = \frac{V}{\rho_0 \cdot c^2} \quad m^5 / N \quad (3)$$

Specifični akustički otpor definiran je kao:

$$Z_c = \rho_0 \cdot c = 415 \quad Ns/m^3 \quad (18^{\circ}C) \quad (4)$$

Brzina zvuka u ovisnosti o temperaturi definirana je kao:

$$c = 331.4 + 0.6 \cdot T = 342,2 \quad m/s \quad (18^{\circ}C) \quad (5)$$

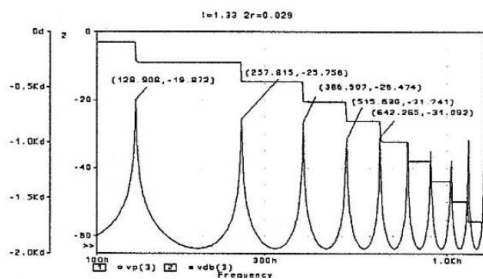
Valna impedancija cijevi definirana je kao:

$$Z_a = \sqrt{\frac{L_a}{C_a}} \quad (6)$$

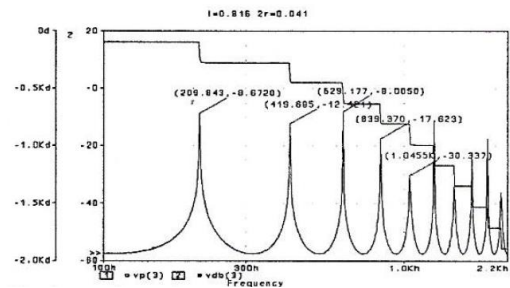
Vrijeme kašnjenja definirano je kao:

$$t_d = \frac{l}{c} \quad (7)$$

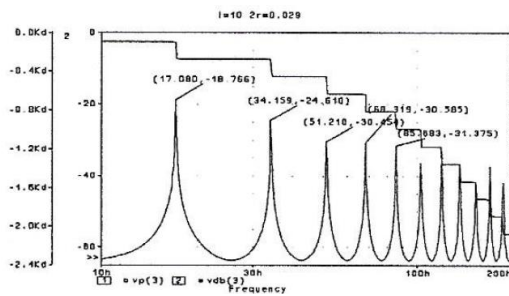
Na slikama 4, 6, 8 (za  $2r = 0.029 \text{ m}$  i  $l = 1.33, 10, 20 \text{ m}$ ) i 5, 7, 9 (za  $2r = 0.041 \text{ m}$  i  $l = 0.816, 10, 20 \text{ m}$ ) prikazani su rezultati simuliranja amplitudne i fazne frekvencijske karakteristike brodskog dojavnog zvukovoda metodom raspodijeljenih parametara uz korištenje PSPICE napudbine.



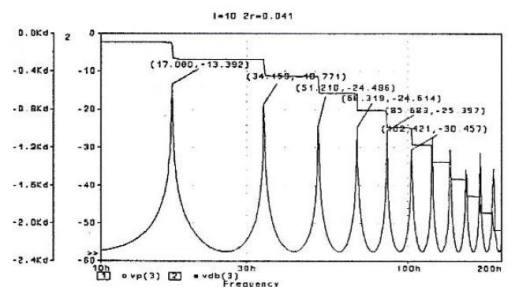
Sl.4 Simulirana amplitudna i fazna frekvencijska karakteristika zvukovoda



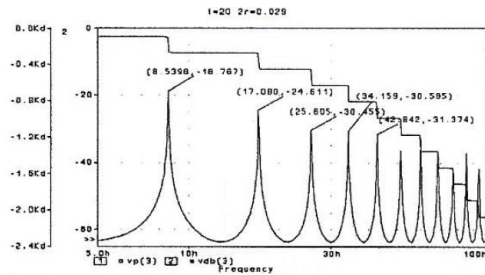
Sl.5 Simulirana amplitudna i fazna frekvencijska karakteristika zvukovoda



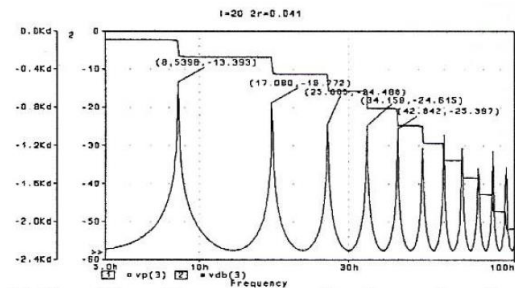
Sl.6 Simulirana amplitudna i fazna frekvencijska karakteristika zvukovoda



Sl.7 Simulirana amplitudna i fazna frekvencijska karakteristika zvukovoda



SI.8 Simulirana amplitudna i fazna frekventijska karakteristika zvukovoda



SI.9 Simulirana amplitudna i fazna frekventijska karakteristika zvukovoda

### 3. Zaključak

Usporedbom izmjerenih karakteristika uzoraka brodskog dojavnog zvukovoda, proračunatih i simuliranih karakteristika uz korištenje akustičko-električnih analogija s primjenom metode raspodijeljenih parametara utvrđeno je da do minimalnih i zanemarivih odstupanja dolazi uslijed različite razlučivosti mjerne opreme i njezinog prikaza od razlučivosti proračuna (koraka proračuna) i njegovog prikaza. Ustanovljeno je da se ta razlika može po volji smanjiti povećanjem razlučivosti što bitno povećava vrijeme proračuna. Povećanjem dužine zvukovoda pomiče se donja granična frekvencija prema nižim frekvencijama i dolazi do zgušnjavanja rezonantnih uzvišenja koja su ovisna samo o dužini zvukovoda, a neovisna su o njegovom promjeru. Izdizanjem vrlo niskih frekvencija dolazi do pojave neprirodnog zvuka, ali zbog dobrog prijenosa srednjih frekvencija uzrokovanog zgušnjavanjem rezonantnih uzvišenja postiže se visoka razumljivost govora. Prikazani model se koristi pri projektiranju zvukovoda.

### Literatura:

- [1] L. L. Beranek, Acoustics, New York, Toronto, London, McGraw-Hill Book Company, 1954, 481 str.
- [2] H. F. Olson, Elements of Acoustical Engineering, Toronto, London, New York, Princeton, New Jersey, D. Van Nostrand Company, Inc., 1955, 539 str.