

UNIVERZA V NOVI GORICI
POSLOVNO-TEHNIŠKA FAKULTETA

**POSTAVITEV IN PREIZKUŠANJE MERILNE OPREME
ZA ŠTUDENTSKE INŠTRUMENTALNE VAJE Z
ULTRAZVOKOM**

DIPLOMSKO DELO

Simon Bratina

Mentor: prof. dr. Iztok Arčon

Nova Gorica, 2012

NASLOV

Postavitev in preizkušanje merilne opreme za študentske eksperimentalne vaje z ultrazvokom

IZVLEČEK

V okviru diplomske naloge je postavljena in testirana merilna naprava za merjenje uklona in interference ultrazvoka na uklonskih režah. Rezultati meritev so ovrednoteni s teoretičnimi modeli, ki temeljijo na fizikalnih zakonitosti valovanja, uklanja in interference ultrazvoka. Pripravljena so tehnična navodila za izvedbo eksperimenta, da bodo lahko študentje pri svojem eksperimentalnem delu uporabljali to opremo in primerjali rezultate meritev s teorijo ultrazvočne interference. S pomočjo Youngovega eksperimenta je predstavljena interferenca zvočnega valovanja na dveh režah. Predstavljen je uklon valovanja na eni reži, interferenca valovanja na dveh, treh, štirih, petih in šestih režah. Podane so enačbe potrebne za analiziranje in primerjavo meritev s teoretičnimi vrednostmi za vsak posamezni primer. Podana je teoretična razlaga meritev in primerjava teoretičnih napovedi z izmerjenimi rezultati. V prilogi so dodana navodila za študente za izvedbo te eksperimentalne vaje.

KLJUČNE BESEDE:

valovanje, uklon ultrazvoka na režah, interferenca ultrazvočnega valovanja.

TITLE

The layout and testing of measuring equipment for students experimental excercises with ultrasound

ABSTRACT

The thesis deals with the installation and testing of the measuring instrument which is used for measuring the diffraction and interference of ultrasonic waves. The results of the measurements are evaluated with theoretical models that are based on physical principles of wave propagation, diffraction and interference of the ultrasound. Technical instructions that explain how to carry out the experiment are included. These will also enable students to use the instruments and compare the results with the theory of the ultrasonic interference. The Young's experiment is used to show the interference of ultrasonic waves on two slits. The ultrasonic wave diffraction is presented on one slit, whereas the interference of ultrasonic waves is presented on two, three, four, five and six slits. Equations which are needed to analyse and compare the measurements to the theoretical value are given for each case, and the theoretical model is compared to measured results.

KEYWORDS:

Waves, Ultrasonic waves diffraction on slits, Interference of ultrasonic waves.

KAZALO

1	UVOD.....	1
2	VALOVANJE	3
2.1	Širjenje motenj.....	3
2.2	Zvočno valovanje	4
2.3	Matematični opis potovanja vala.....	6
2.4	Sinusno valovanje.....	7
2.5	Sinusno zvočno valovanje	9
3	INTEFERENCA VALOVANJ	11
3.1	Interferenca zvočnega valovanja na dveh ozkih režah	14
3.2	Intenziteta valovanja pri interferenci za dvema ozkima režama	17
4	INTERFERENCA VALOV ZA VEČ REŽAMI	20
4.1	Uklon valovanja na široki reži.....	20
4.2	Intenziteta valovanja pri interferenci za dvema širokima režama	23
4.3	Intenziteta valovanja za tremi širokimi režami	24
4.4	Intenziteta valovanja za štirimi širokimi režami	26
4.5	Intenziteta valovanja za petimi širokimi režami.....	27
4.6	Intenziteta valovanja za šestimi širokimi režami.....	29
5	MERITVE	31
6	ANALIZA	35
7	ZAKLJUČEK.....	41

8	LITERATURA	42
9	PRILOGA: Navodilo za izvedbo eksperimenta	43
9.1	Namen in značilne lastnosti goniometra.....	44
9.2	Operacijska enota goniometra	45
9.3	Goniometer z odbojnim zrcalom	46
9.4	Ultrazvočna enota	47
9.5	Navodilo za sestavo in povezavo goniometra	48
9.6	Kotna kalibracija operacijske enote goniometra	51
9.7	Pregrada in okvir rež	51
9.8	Priprava eksperimenta za preizkus delovanja.....	52
9.9	Spisek uporabljenih naprav in materialov	53

KAZALO SLIK

Slika 1: Širjenje transverzalnih valov na struni.....	4
Slika 2: Prikaz longitudinalnega valovanja vzmeti.....	4
Slika 3: Potovanje spremembe tlaka skozi plin.....	5
Slika 5: Transverzalni val na vrvi ob času t	7
Slika 4: Transverzalni val na vrvi ob času $t = 0$	7
Slika 6: Sinusni val, ki potuje v desno s hitrostjo v : rdeča črta – val ob času $t = 0$, modra črta – val ob poznejšem času t	8
Slika 7 : Sinusno longitudinalno valovanje v plinu.....	9
Slika 8: Grafični prikaz spremembe tlaka v sinusnem zvočnem valu.....	10
Slika 9: Interferenca dveh valov na napeti vrvi.....	11
Slika 10: Superpozicija dveh enakih, fazno zamaknjenih sinusnih valovanj, ki potujeta v isto smer; a) vala v fazi, b) vala zamaknjena za pol valovne dolžine, c) vala zamaknjena za šestino valovne dolžine. Vala, ki interferirata, sta narisana z modro in rdečo črto, interferenčni val pa z vijolično. Na sliki a sta vala y_1 in y_2 označena modro, ker sta v fazi.....	12
Slika 11: Spreminjanje poti, zgornjo pot lahko daljšamo ali krajšamo po principu pozavne.....	13
Slika 12: Youngov eksperiment z zvočnim valovanjem.....	15
Slika 13: Območja ojačitev in oslabitev glede na fazno zamaknjenost valov iz dveh rež.....	15
Slika 14: Grafični prikaz za izračun razlike poti med valoma iz dveh rež v odvisnosti od kota širjenja glede na simetralo med režama.....	16

Slika 15: Fazni zamik dveh valov iz dveh rež S_1 in S_2 v točki P na oddaljenem zaslonu.....	18
Slika 16: Graf intenzitete valovanja za dvema ozkima režama v odvisnosti od kota glede na smer simetrale med režama, pri izbrani razdalji med režama d	19
Slika 17: Vzorec uklona na široki reži.	20
Slika 18: Fazni diagrami amplitude spremembe tlaka.	21
Slika 19: Kazalčni diagram za izračun spremembe amplitude tlaka na eni široki reži.	22
Slika 20: Prikaz porazdelitve jakosti valovanja za eno režo. Kot vidimo je največja jakost I_{\max} pri kotu $\theta=0$	23
Slika 21: Graf intenzitete interference valovanja na dveh širokih režah (rdeča črta). Opazimo centralni primarni maksimum in dva stranska primarna maksimuma. Z modro črto je narisana ovojnica interferenčne slike, ki je posledica uklona na širokih režah.	24
Slika 22: Graf intenzitete valovanja za tremi režami (rdeča črta označuje interferenco valovanja za tremi velikimi režami, modra pa obliko ovojnice zaradi uklona na eni širokih režah).....	25
Slika 23: Kazalčni diagram amplitude spremembe tlaka za tremi režami.	25
Slika 24: Kazalčni diagram amplitude spremembe tlaka za štirimi režami.	26
Slika 25: Graf intenzitete valovanja za štirimi režami.	27
Slika 26: Graf intenzitete valovanja za petimi režami na oddaljenem zaslonu.....	28
Slika 27: Kazalčni diagram amplitude spremembe tlaka za petimi režami.	28
Slika 28: Graf intenzitete valovanja za šestimi režami.	29
Slika 29: Kazalčni diagram amplitude spremembe tlaka za šestimi režami.	30

Slika 30: Shematični prikaz postavitve eksperimenta za merjenje uklona ultrazvoka na režah.	31
Slika 31: Fotografija eksperimenta za merjenje uklona ultrazvoka na režah.	32
Slika 32: Tloris goniometra.	33
Slika 33: Graf primerjave teoretične interference ultrazvočnega valovanja za dvema velikima režama s praktično meritvijo.	34
Slika 34: Uklon ultrazvočnega valovanja na reži širine 1 mm.	35
Slika 35: Interferenca valovanja na dveh režah širine 1 mm, razmaknjenih za 16 mm.	35
Slika 36: Interferenca valovanja na treh režah širine 1 mm, razmaknjenih za 16 mm.	36
Slika 37: Interferenca valovanja na štirih režah širine 1 mm, razmaknjenih za 16 mm.	36
Slika 38: Interferenca valovanja na petih režah širine 1 mm, razmaknjenih za 16 mm.	36
Slika 39: Interferenca valovanja na šestih režah širine 1 mm, razmaknjenih za 16 mm.	37
Slika 40: Uklon valovanja na eni reži širine 11 mm.	38
Slika 41: Interferenca valovanja na dveh režah širine 11 mm, razmaknjenih za 16 mm.	38
Slika 42: Interferenca valovanja na treh režah širine 11 mm, razmaknjenih za 16 mm.	38
Slika 43: Interferenca valovanja na štirih režah širine 11 mm, razmaknjenih za 16 mm.	39

Slika 44: Interferenca valovanja na štirih režah širine 11 mm, razmaknjenih za 16 mm.....	39
Slika 45: Interferenca valovanja na šestih režah širine 11 mm, razmaknjenih za 16 mm.....	39
Slika 46: Goniometer z odbojnim zrcalom in operacijska enota goniometra.	43
Slika 47: Shema elementov potrebna za meritev.	44
Slika 48: Pogled na čelno ploščo operacijske enote goniometra.	45
Slika 49: Goniometer z odbojnim zrcalom.	46
Slika 50: Ultrazvočna enota.	47
Slika 51: Komplet ultrazvočne enote.	48
Slika 52: Okvir rež in proti zvočna pregrada.	52

1 UVOD

V diplomski nalogi smo postavili demonstracijski eksperiment z ultrazvokom, pri katerem bi se študentje spoznali z osnovnimi pojmi iz valovanja, širjenjem in detekcijo ultrazvoka ter uporabo ultrazvoka v različnih merilnih tehnikah. Valovanje je potovanje motnje skozi prostor, s katerim se prenaša energija in gibalna količina. Ultrazvok je mehansko valovanje v področju frekvenc nad 20000 Hz, se pravi nad področjem frekvenc (20-20000 Hz), ki mu pravimo slišno področje, katerega psihološko in fiziološko zaznavamo kot zvok.

Postavili in testirali smo več eksperimentov z uklonom in interferenco ultrazvoka, kot karakterističnimi pojavi za valovanje, na več režah. Uklon valovanja nastaja, ko valovanje prehaja skozi režo ali mimo prepreke, za katero se valovanje ne širi le frontalno, temveč se uklanja v levo in desno. Pri režah manjših od valovne dolžine, se valovanje obnaša kot da bi izviralo iz točkastega izvora. Za režami, ki so večje od valovne dolžine, pa je uklon manj izrazit.

Za eksperimente smo uporabili razpoložljivo opremo za izvedbo praktičnih vaj iz merilnih tehnik na drugi stopnji Gospodarskega inženiringa na Univerzi v Novi Gorici. Oprema zajema izvor in detektor ultrazvoka, konkavno zrcalo, goniometer s kotno skalo na mizi, vrtljivo roko za namestitev ultrazvočnega sprejemnika. Goniometer upravlja operacijska enota. Ultrazvočni sprejemnik in oddajnik pa sta povezana z ultrazvočno enoto. Na razpolago je tudi računalniška oprema za avtomatsko zajemanje merjenih podatkov in programska oprema za prikaz izmerjenih spektrov.

Cilj naloge je postaviti in testirati merilno napravo za ultrazvok in ovrednotiti rezultate meritev s teoretičnimi modeli, ki temeljijo na fizikalnih zakonitostih valovanja, uklanjanja in interference ultrazvoka. Poleg tega smo za cilj zastavili tudi pripravo ustreznih tehničnih navodil za izvedbo eksperimenta. Tako bodo lahko študentje pri svojem eksperimentalnem delu uporabljali to opremo in primerjali rezultate meritev s teorijo ultrazvočne interference.

V teoretičnem delu je predstavljena teorija širjenja sinusnega valovanja na struni, ter širjenja sinusnega zvočnega valovanja. Opisana sta uklon in interferenca valovanja. Predstavljen je matematični model za opis intenzitete valovanja pri interferenci valovanja na eni in več režah.

V nalogi so podrobno opisani eksperimenti z uklonom in interferenco valovanja ultrazvoka na eni, dveh, treh, štirih, petih in šestih ozkih ter širokih režah. Za vse omenjene primere smo

izmerili intenziteto ultrazvoka v odvisnosti od kota širjenja valovanja za režami in izmerjene spektre primerjali s teoretičnimi modeli. Teoretični izračuni dobro opišejo izmerjene spektre. Manjša odstopanja so posledica merskih napak. Te se pojavljajo tudi zato, ker so meritve opravljene v prostoru, ki sicer ni izrecno namenjen izvedbi tovrstnih poskusov.

V nalogi je predstavljen način avtomatskega vodenja eksperimenta in zajemanja podatkov. S pomočjo osebnega računalnika lahko izmerjene spektre predstavimo tako v grafični obliki kot v tabelarni obliki.

Za študente smo pripravili natančna tehnična navodila za izvedbo vaje z ultrazvokom. Podana so navodila za pripravo in postavitve opreme in navodila za kalibracijo inštrumenta pred začetkom meritev. Priložena je tudi tehnična dokumentacija razpoložljive opreme.

2 VALOVANJE

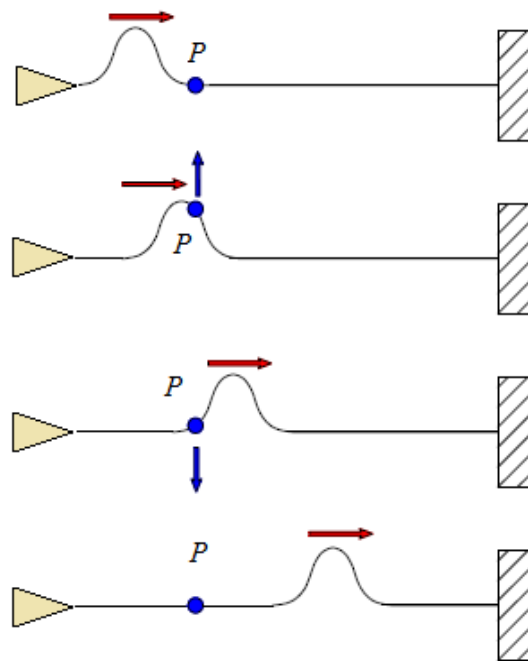
Valovanje je širjenje motnje skozi snov ali prostor. Poznamo dve vrsti valovanj, in sicer longitudinalno (primer je valovanje zraka, ki ga slišimo kot zvok, valovanje na vzmeti ...) in transverzalno valovanje (valovanje na struni, elektromagnetno valovanje...) (Halliday in drugi, 2004). Pri longitudinalnem valovanju se delčki snovi odklanjajo od ravnovesne lege vzdolžno v smeri širjenja motnje. Pri transverzalnem valovanju pa delčki nihajo prečno oziroma pravokotno na smer širjenja motnje. Valovanje ne prenaša samo motnje, ampak tudi energijo.

Valovanja lahko ločimo tudi glede na to, ali potujejo po nekem mediju (snovi) oz tista, ki potujejo tudi po praznem prostoru. Prvim pravimo mehanska valovanja, druga pa so elektromagnetna valovanja. Primeri mehanskih valovanj so zvok, valovanje na struni, valovanje na vodni gladini in druga. V teh primerih je snov prenosnik valovanja. Elektromagnetno valovanje pa ne potrebuje snovi za širjenje, potuje lahko tudi skozi vakuum. V tem delu se bomo osredotočili le na mehanska valovanja in od teh še posebej na zvok.

2.1 Širjenje motenj

V uvodu smo že omenili, da je valovanje širjenje motnje skozi snov in prenašanje energije iz delca na delec v tej snovi, brez spreminjanja lastnosti ali strukture snovi. Za razumevanje mehanskega valovanja moramo poznati vir motnje, snov, ki valovanje prenaša in fizikalne mehanizme, s katerimi delujejo nihajoči delci snovi na sosednje delce in omogočajo prenos valovanja.

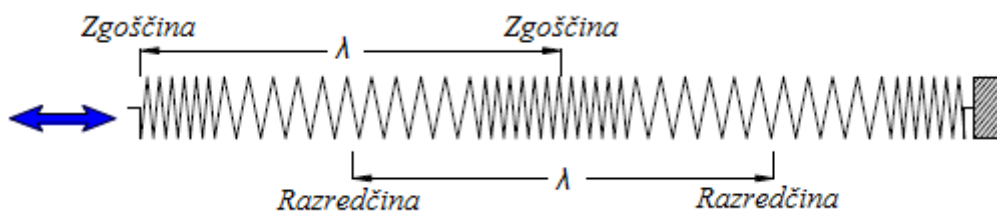
Eden od načinov za ponazoritev potovanja valovanja je vrv, ki je na eni strani vpeta v steno, na drugi strani pa jo z roko napnemo (glej sliko 1). Če z roko, s katero napenjamo vrv enkrat sunemo gor in nato nazaj dol, opazimo, da smo na vrvi povzročili motnjo, ki se giblje v smeri stene z določeno hitrostjo. Slika 1 prikazuje štiri zaporedne posnetke potovanja motnje, ki jo lahko imenujemo val. Vrv je medij, po katerem potuje valovanje. Hitrost s katero potuje val, določa napetost vrvi in masa vrvi na enoto dolžine (Halliday in drugi, 2004).



Slika 1: Širjenje transverzalnih valov na struni.

Na sliki 1 vidimo, da se točke na vrvi premikajo pravokotno na smer potovanja valov, kar pomeni, da je to valovanje transverzalno. Motnja se prenaša iz delčka vrvi na sosednji delček v smeri potovanja vala, delčki ali točke pa se gibljejo pravokotno na ravnovesno lego vrvi.

Primer longitudinalnega valovanja je valovanje na vzmeti. Za primer vzamemo dolgo vzmet, na enem koncu pritrjeno v steno, drugi konec pa napnemo. Če konec vzmeti na hitro napnemo in nato hitro popustimo, vidimo, da se pojavijo območja na vzmeti, nekatera zgoščena, nekatera pa redkejša, kot prikazuje slika 2. Če to početje nekajkrat ponovimo, vidimo, da deli vzmeti nihajo. Točke na vzmeti nihajo vzdolž širjenja motnje.

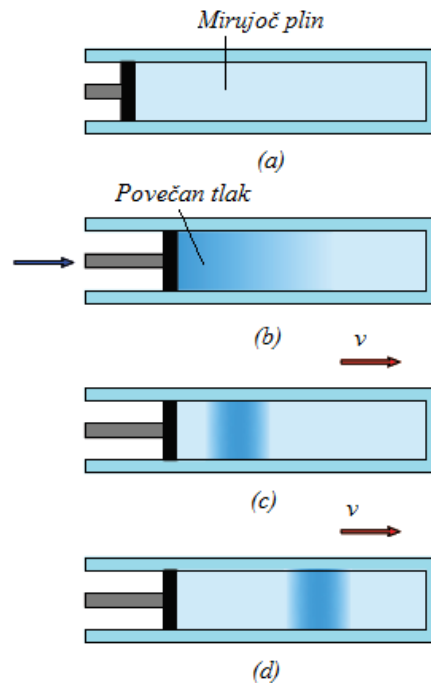


Slika 2: Prikaz longitudinalnega valovanja vzmeti.

2.2 Zvočno valovanje

Zvočno valovanje je longitudinalno kadar se motnja širi skozi plin. Skozi trdno snov se zvočno valovanje širi v dveh oblikah, kot stisljivo longitudinalno in strižno transverzalno. Motnja v zvočnem valovanju, ki potuje skozi zrak, je serija delčkov zraka v območju

zgoščine, kjer je povečanje pritiska in serija delčkov zraka v razredčini, kjer je zmanjšan pritisk v primerjavi z nemotenim zrakom. Poudariti moramo, da ne potujejo deli zraka, temveč se prenaša motnja, to so zgoščine oz. razredčine v zraku. Te motnje lahko opišemo z lokalno spremembo tlaka in lokalno spremembo gostote zraka.



Slika 3: Potovanje spremembe tlaka skozi plin.

V cevi imamo stisljiv plin. Ko bat na levi premaknemo proti desni ustvarimo impulz. Plin v cevi je na začetku enakomerno razporejen (slika 3a). Ko premaknemo bat, se za batom plin zgosti in je temneje obarvan (slika 3b). Tlak in gostota plina sta v temneje obarvanem predelu višji, kot sta bili pred premikom bata. Zgoščina v cevi se premika proti desni strani, čeprav bat obstane na mestu (slika 3c, d). Zgoščina potuje proti desni s hitrostjo v , ki pa ni enaka hitrosti, s katero smo premaknili bat. Tako smo ustvarili longitudinalni val v plinu. Fazna hitrost valovanja v plinu z gostoto ρ in modulom stisljivosti K je:

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}.$$

Ta izraz lahko primerjamo z izrazom za hitrost transverzalnega valovanja na vrvi:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}},$$

kjer je F natezna sila v vrvi in μ dolžinska gostota vrvi. V obeh primerih je hitrost odvisna od specifične mase medija in napetosti medija:

$$v = \sqrt{\frac{\text{elastičnostne lastnosti}}{\text{vztrajnostne lastnosti}}}.$$

Hitrost zvoka je odvisna tudi od temperature medija. Za potovanje zvoka skozi zrak je povezava med hitrostjo zvoka v in temperaturo zraka T sledeča (Halliday in drugi, 2004):

$$v = v_0 \sqrt{1 + \frac{T}{T_0}},$$

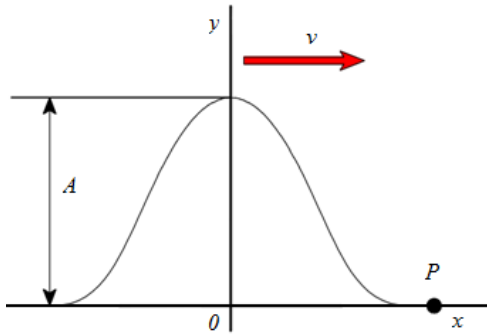
kjer je $v_0 = 331$ m/s hitrost zvoka v zraku pri temperaturi $T_0 = 273$ °K. Hitrost zvoka pri sobni temperaturi 293 °K (20 °C) je 343 m/s.

Zvočne valove delimo glede na frekvenco v tri skupine, in sicer:

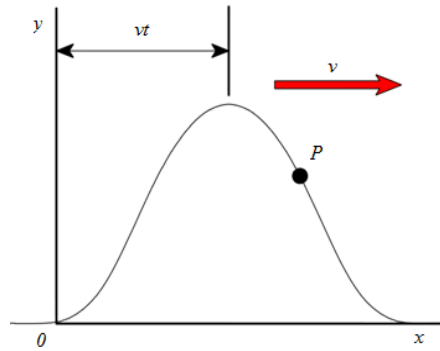
- zvočni valovi, ki jih zazna človeško uho. Te valove povzročajo glasbila, glasilke ljudi, zvočniki... (razpon frekvenc od 20 Hz do 20 000 Hz);
- infrazvoki imajo frekvence nižje od našega slišnega spektra. Teh zvokov ne slišimo. Sloni jih uporabljajo za komuniciranje na zelo velike razdalje... (frekvence manjše od 50 Hz);
- ultrazvok je zvok s frekvencami višjimi od 20000 Hz in je človeškemu sluhu nezaznaven. Te zvoke uporabljajo netopirji za orientacijo v prostoru. Ultrazvok uporabljajo v medicini (Vidic, 2009) in tehniki (Krautkramer in Krautkramer, 1990).

2.3 Matematični opis potovanja vala

Vzamemo za primer valovanje na dolgi napeti vrvi. Slika 4 predstavlja položaj transverzalnega vala v odvisnosti od koordinate x v času $t = 0$. V tej točki lahko matematično opišemo obliko vala s funkcijo $f(x)$. Če je hitrost vala v , se ta val premakne v desno v času t za razdaljo vt (slika 5). Če se oblika vala s časom ne spreminja, je slika vala v času t enaka, kot je bila v času $t = 0$, le položaj vala je premaknjen.



Slika 5: Transverzalni val na vrvi
ob času $t = 0$.



Slika 4: Transverzalni val na vrvi
ob času t .

Na splošno lahko zapišemo za vse vrednosti na osi y in za vse čase t , ko potuje val proti desni strani osi x , da velja:

$$y(x, t) = f(x - vt).$$

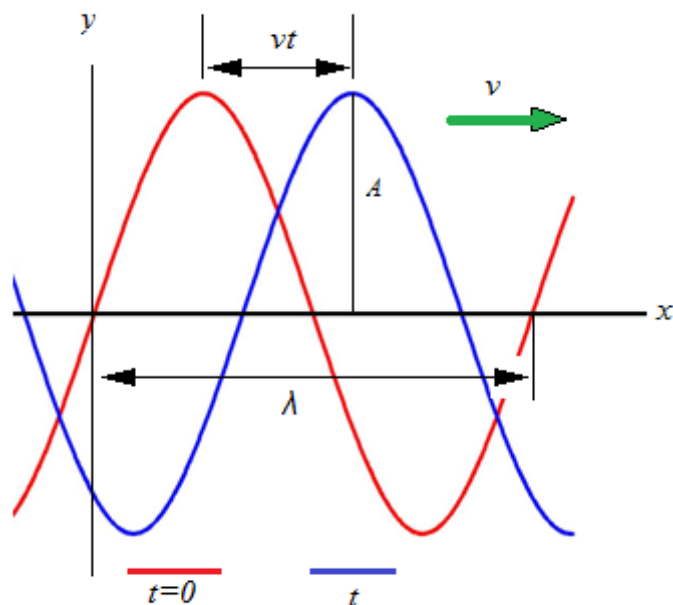
Prav tako velja tudi, ko val potuje proti levi strani osi x , da je:

$$y(x, t) = f(x + vt).$$

Funkcija valovanja $y(x, t)$ ponazarja spreminjanje vrednosti na osi y za vse točke na osi x , v katerem koli času t . Če pa na primer posnamemo dogajanje na vrvi, ko skozi potuje motnja (ob nekem določenem času), takrat funkcija $y(x)$ predstavlja dejansko geometrično obliko vala v tem času.

2.4 Sinusno valovanje

Sinusno valovanje je periodično, tako kot je prikazano na sliki 6. Matematičen opis sinusnega vala je podan v enačbi (1). Tako valovanje lahko ustvarimo na vrvi, če en konec vrvi enakomerno nihamo z roko gor in dol in ustvarjamo preprosto harmonično gibanje.



Slika 6: Sinusni val, ki potuje v desno s hitrostjo v : rdeča črta – val ob času $t = 0$, modra črta – val ob poznejšem času t .

Rdeča krivulja na sliki 6 predstavlja sinusno valovanje ob času $t = 0$. Krivulja obarvana z modro pa predstavlja isto valovanje v kasnejšem času t . Opazimo, da se točke na vrvi gibljejo pravokotno na os x , medtem, ko se valovanje prenaša iz točke na točko v smeri x s hitrostjo v . Premik vala v času t je $\Delta x = vt$. Valovna dolžina λ je razdalja med dvema maksimumoma ali minimumoma (Slika 6). Maksimalen odmik točke iz ravnovesne lege imenujemo amplituda in ga bomo označevali z A . Fazni zamik je na sliki 6 označen kot razdalja med rdečim in modrim vrhom (vt). Čas, ki ga valovanje potrebuje, za premik za eno valovno dolžino, je čas ene periode oz. enega nihaja T . Frekvenca f označuje število nihajev v časovni enoti in je povezana z nihajnim časom T :

$$f = \frac{1}{T}.$$

Pogosto pri opisu valovanja vpeljemo dve novi količini, to je valovno število k in kotno frekvenco ω :

$$k \equiv \frac{2\pi}{\lambda} \text{ in } \omega \equiv \frac{2\pi}{T},$$

Tako sinusni val, ki potuje v desno, opišemo z enačbo:

$$y = A \sin(kx - \omega t + \phi) , \quad (1)$$

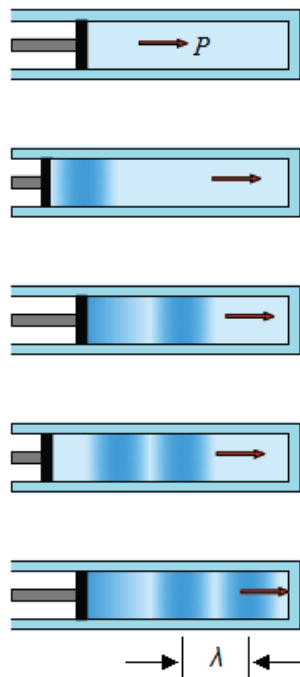
kjer je relacija med hitrostjo valovanja in frekvenco ter valovno dolžino podana z:

$$v = \frac{\omega}{k} \text{ oziroma } v = \lambda f .$$

Fazna konstanta ϕ opiše fazni zamik valovanja.

2.5 Sinusno zvočno valovanje

Oglejmo si generiranje in potovanje sinusnega zvočnega vala od izvora (zvočnika) do detektorja. Za primer vzemimo cev s plinom ter gibajočim batom na levem koncu (slika 7). Bat bomo periodično (sinusno) premikali levo / desno. Ko bat potisnemo desno, se za batom plin zgosti in se poveča pritisk v tem območju. Zatem potisnemo bat v levo, v tem trenutku za batom nastane razredčina, kjer je pritisk v plinu manjši. Če tako nihanje bata nadaljujemo, v cevi s plinom ustvarimo longitudinalno sinusno valovanje. Razdaljo od ene zgoščine do druge imenujemo valovno dolžino λ .

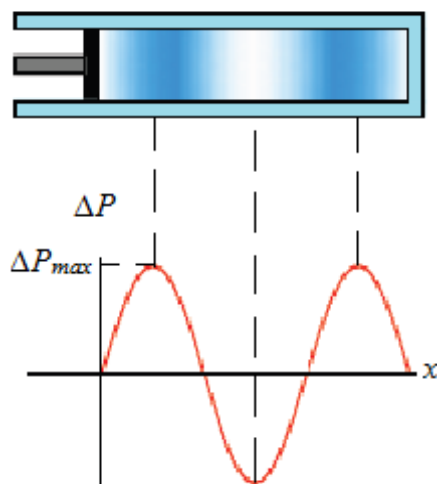


Slika 7 : Sinusno longitudinalno valovanje v plinu.

Zvočno valovanje lahko opišemo kot nihanje pritiska v plinu P:

$$\Delta P = \Delta P_{\max} \sin(kx - \omega t). \quad (2)$$

ΔP_{\max} je največja sprememba pritiska zraku. V nadaljevanju bomo amplitudo spremembe tlaka (ΔP_{\max}) označevali z A zaradi krajšega zapisa. Grafično je sinusni zvočni val prikazan na sliki 8.



Slika 8: Grafični prikaz spremembe tlaka v sinusnem zvočnem valu.

Energijski tok, ki ga prenaša zvočno valovanje, je definiran kot energija E , ki jo prenaša sprememba pritiska v zraku na časovno enoto:

$$W = \frac{\Delta E}{\Delta t}.$$

Intenziteta zvočnega valovanja pa je definirana kot energijski tok na enoto površine:

$$I = \frac{W}{S}.$$

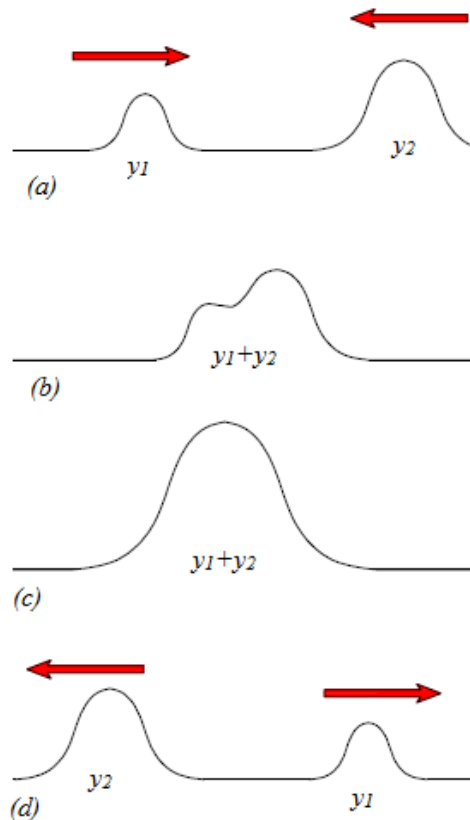
Intenziteta je sorazmerna s kvadratom amplitude spremembe tlaka A (Halliday in drugi, 2004):

$$I = \frac{A^2}{2\rho v}, \quad (3)$$

kjer je ρ specifična gostota zraka in v je hitrost zvočnega valovanja.

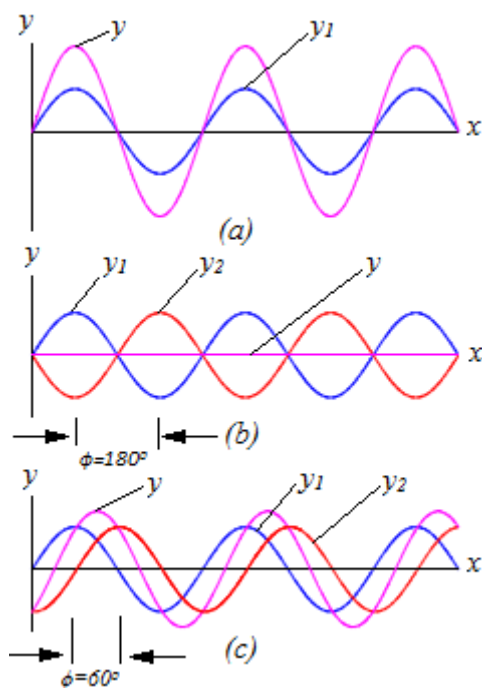
3 INTERFERENCA VALOVANJ

Kaj se zgodi, ko se dva vala srečata na istem mestu? Velja načelo superpozicije valov, čemur rečemo tudi interferenca. Pri interferenci se seštevajo amplitude valovanj. Primer je ilustriran na sliki 9 za dve valovanji na napeti vrvi.



Slika 9: Interferenca dveh valov na napeti vrvi.

Ko se dva vala srečata, potujeta en skozi drugega. Podoben pojav lahko srečamo, ko skozi zrak potujeta dve različni zvočni valovanji. Ob srečanju se ti dve zvočni valovanji seštevata oz interferirata. Interferenca je lahko konstruktivna, če sta odmika valovanj enako predznačena, ali destruktivna, ko sta odmika valovanj nasprotnega predznaka.



Slika 10: Superpozicija dveh enakih, fazno zamaknjenih sinusnih valovanj, ki potujeta v isto smer; a) vala v fazi, b) vala zamaknjena za pol valovne dolžine, c) vala zamaknjena za šestino valovne dolžine. Vala, ki interferirata, sta narisana z modro in rdečo črto, interferenčni val pa z vijolično. Na sliki a sta vala y_1 in y_2 označena modro, ker sta v fazi.

Načelo superpozicije torej pove, da če se dva ali več valov giblje po nekem mediju, je val v vsaki točki algebrična vsota vseh valov v tej točki. Če to načelo uporabimo za opazovanje dveh sinusnih valov z enako frekvenco, amplitudo in valovno dolžino, ki se razlikujeta le v fazi valovanja, kjer je ϕ fazni zamik med valoma, potem lahko zapišemo vsoto valov kot:

$$y = y_1 + y_2 = A[\sin(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t + \phi)], \quad (4)$$

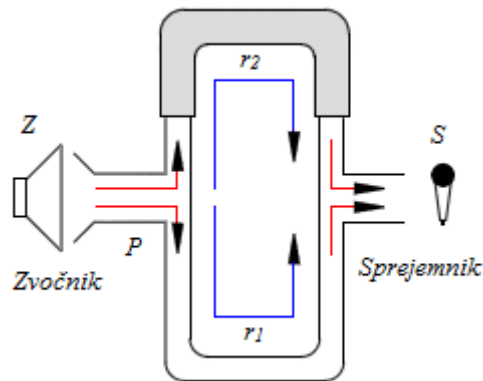
če uporabimo zvezo iz trigonometrije (Halliday in drugi, 2004):

$$\sin a + \sin b = 2 \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

dobimo izraz za vsoto valovanj:

$$y = 2A \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right). \quad (5)$$

Vidimo, da se dva enaka sinusna vala ki sta zamaknjena v fazi, seštejeta v sestavljeni val, ki se po frekvenci in valovni dolžini ujema z obema valoma, iz katerih je sestavljen. Amplituda sestavljenega vala pa je odvisna od faznega zamika med obema valoma: $2A \cos(\phi/2)$. Na sliki 10a je prikazan ta pojav za valovanje v fazi ($\phi=0$). Amplituda sestavljenega vala je enaka vsoti obeh amplitud posameznih valov. Slika 10b prikazuje interferenco dveh sinusnih valov, kjer je njun fazni zamik $\phi=180^\circ$. Amplituda vsote obeh valov je povsod nič. Valovanje destruktivno interferirata. Slika 10c prikazuje vsoto dveh sinusnih valov s faznim zamikom $\phi=60^\circ$. Amplituda vsote je le malo večja od amplitude posameznih valov.



Slika 11: Spreminjanje poti, zgornjo pot lahko daljšamo ali krajšamo po principu pozavne.

Za lažje razumevanje interference zvočnih valov si oglejmo sliko 11. Zvok, ki ga ustvarja zvočnik Z, pošljemo v cev skozi točko P, kjer je križišče cevi v obliki črke T. Pol zvočne moči potuje skozi zgornjo cev, pol skozi spodnjo cev. Spodnja cev ima dolžino r_1 in je konstantna, zgornja cev ima dolžino r_2 , ki jo lahko spreminjamo podobno kot pri pozavni.

Zvok, ki doseže sprejemnik S, potuje po obeh ceveh. Če je razlika poti zvoka po obeh krakih $\Delta r = |r_2 - r_1|$ enaka nič ali enaka valovni dolžini ali večkratniku valovne dolžine

$$(\Delta r = n\lambda, n = 1, 2, 3, \dots),$$

tedaj v sprejemniku S slišimo ojačen zvok. Grafična slika teh dveh zvokov ustreza sliki 10a, ker sta valovanja v fazi. Ko pa je razlika poti po obeh ceveh r enaka polovici valovne dolžine $\lambda/2$, ali $3\lambda/2, \dots, n\lambda/2$ (za vse lihe n), valovanje destruktivno interferirata. V sprejemniku ne zaznamo nobenega zvoka. To ustreza situaciji, ki jo kaže slika 10b.

Pogosto je koristno, da izrazimo razliko poti v smislu faznega zamika med valovi. Razlika v poti za eno valovno dolžino ustreza faznemu zamiku 2π radianov. Od tod dobimo zvezo $\phi/2\pi = \Delta r/\lambda$ ali:

$$\Delta r = \frac{\phi}{2\pi} \lambda . \quad (6)$$

To razliko poti lahko uporabimo tudi za izračun kota ϕ , pri katerem bomo imeli ojačitve valovanja in oslabitve valovanja. Torej, če imamo sode večkratnike $\lambda/2$, takrat je fazni zamik $\phi = 2n\pi$ (n so vsa naravna števila) in imamo ojačitve. Ko pa so lihi večkratniki $\lambda/2$, takrat je fazni zamik $\phi = (2n + 1)\pi$ (n so naravna števila) imamo oslabitve:

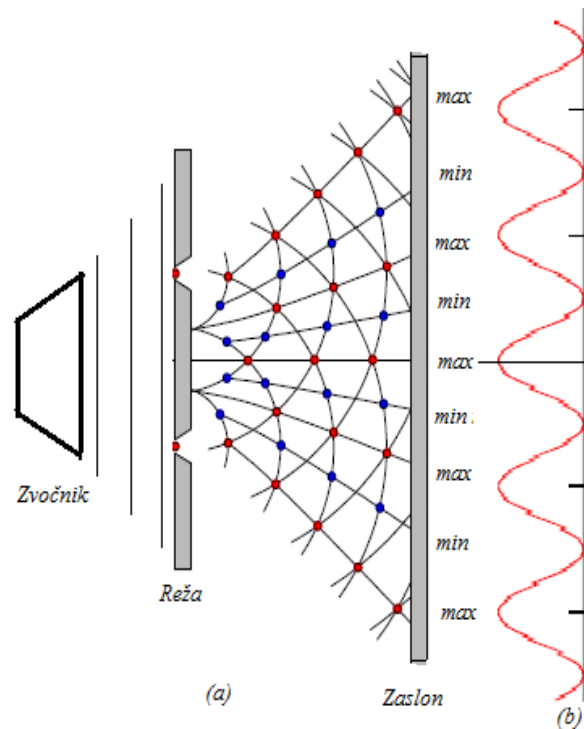
$$\Delta r = (2n) \frac{\lambda}{2} \text{ ojačitve;} \quad (7)$$

$$\Delta r = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ oslabitve.} \quad (8)$$

3.1 Interferenca zvočnega valovanja na dveh ozkih režah

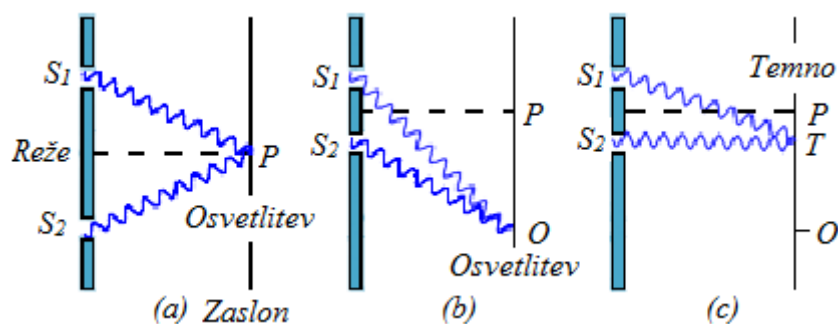
Oglejmo si interferenco zvočnih valov, ki se širijo po prostoru v vseh smereh. Za predstavitev pojava se omejimo na ravninski primer, ko interferira zvočno valovanje, ki prehaja skozi dve reži v zaslonu (slika 12). Da lahko izvedemo tak poskus, moramo zadostiti dvema pogojema, in sicer: izvor zvočnega valovanja mora nenehno vzdrževati svojo lastno fazno zamaknjenost in imeti mora eno samo valovno dolžino.

Eksperiment je prikazan na sliki 12. Zvočnik oddaja zvočne valove z eno samo frekvenco. Valovi prehajajo skozi reži na zaslon, se na režah uklanjajo in za režama interferirajo med seboj. Ta poskus je za svetlobo (elektromagnetno valovanje) prvi demonstriral Thomas Young leta 1801. Ko zvok pride skozi reže, se za pregrado pojavijo območja ojačitev in oslabitev. Ojačitve so območja, kjer se zvočno valovanje sešteva, na zaslonu je tam večja vrednost, oslabitve so območja, kjer se zvočno valovanje izniči, zato je na zaslonu vrednost nič.



Slika 12: Youngov eksperiment z zvočnim valovanjem.

Slika 13a prikazuje, kako dve valovanji padeta na zaslon, ko potujeta po enako dolgi razdalji in sta v fazi. Ko dosežeta točko P, je na zaslonu območje ojačitve. Slika 13b prikazuje, ko dve valovanji dosežeta točko O izven simetrale med režama. Zgornje valovanje opravi za eno valovno dolžino daljšo pot kot spodnje. Kljub različnim potem sta vala v fazi in območje na zaslonu je tudi tu območje ojačitve. Slika 13c prikazuje dva vala, ki padeta v točko T. Pot za zgornji val je daljša za pol valovne dolžine kot za spodnji val. Ta dva vala nista v fazi, zato je tu območje oslabitve.

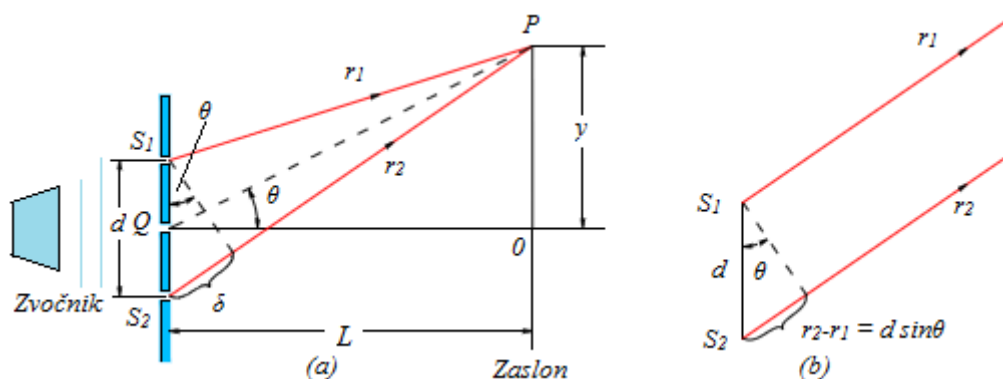


Slika 13: Območja ojačitev in oslabitev glede na fazno zamaknjenost valov iz dveh rež.

Na sliki 14a je prikazana pregrada z dvema režama, ki sta med seboj oddaljeni za razdaljo d . Zaslon, kjer merimo intenziteto valovanja, je od rež oddaljen za razdaljo L . Upoštevajmo, da je razdalja L veliko večja od razmika med režama d ($d \ll L$). Pregrada in zaslon sta med seboj

vzporedna. Ko se valovanji iz spodnje in zgornje reže srečata v točki P na zaslonu, opazimo, da je moralo valovanje iz spodnje reže opraviti daljšo pot, kot valovanje iz zgornje reže, in to za razliko $d \sin \theta$. To razdaljo imenujemo razlika poti in jo označimo z δ :

$$\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta . \quad (9)$$



Slika 14: Grafični prikaz za izračun razlike poti med valoma iz dveh rež v odvisnosti od kota širjenja glede na simetralo med režama.

Vrednost δ določa ali sta vala iz reže S_1 in S_2 v fazi, ko dosežejo točko P. Če je δ nič, ali večkratnik valovne dolžine, je na zaslonu valovanje ojačeno. Torej so ojačitve v točki P pri pogoju:

$$\delta = d \sin \theta = n \lambda, (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots), \quad (10)$$

kjer je n število ojačitve. Srednja ojačitev se imenuje ničta ojačitev. Ko je razlika poti večkratnik $\lambda/2$, tedaj sta vala v fazi zamaknjena za 180° in na zaslonu v točki P dobimo oslabitev valovanja:

$$\delta = d \sin \theta = \left(n + \frac{1}{2} \right) \lambda, (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots). \quad (11)$$

Poiskati moramo uporabnejšo enačbo za iskanje ojačitev in oslabitev, gledano na lego na zaslonu. Ugotovili smo že, da je $d \ll L$. To seveda velja, če je θ majhen kot. Za majhne kote velja, da je $\sin \theta \approx \tan \theta$. Iz trikotnika OPQ na sliki 14a vidimo, da lahko zapišemo:

$$y = L \tan \theta \approx L \sin \theta .$$

Tako lahko zapišemo še enačbo za vse ojačitve:

$$y_{\text{ojačaji}} = \frac{\lambda L}{d} n, (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots). \quad (12)$$

Podobno velja tudi za oslabitve:

$$y_{\text{oslabitev}} = \frac{\lambda L}{d} \left(n + \frac{1}{2} \right), (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots). \quad (13)$$

Young je s takim eksperimentom s svetlobo dokazal, da interferenca na dvojni reži povzroča značilno interferenčno sliko, kjer se daleč od rež, na zaslonu, pojavijo ojačitve in oslabitve svetlobe. Področja z ojačitvami imajo večjo amplitudo od izvirnega svetlobnega vala iz ene reže. Na območjih z oslabitvami se valovanja izničijo in zaslon ni osvetljen.

3.2 Intenziteta valovanja pri interferenci za dvema ozkima režama

V prejšnji točki smo se osredotočali samo na področja, kjer so nastajala izrazita območja ojačitev in oslabitev valovanja. Sedaj pa bomo obravnavali celotni zaslon. Zanimala nas bo intenziteta valovanja povsod na zaslonu za dvema ozkima režama, ne le v točkah, kjer se pojavijo ojačitve in oslabitve.

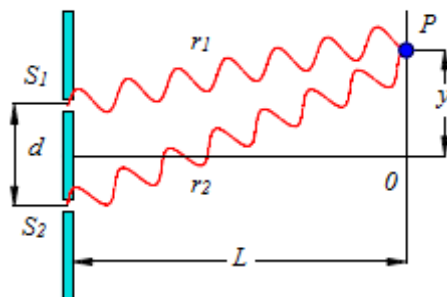
Razmik med režama naj bo večji od valovne dolžine valovanja. Reži sta ozki v primerjavi z valovno dolžino valovanja. Zopet moramo za primer vzeti, da je valovanje, ki prehaja skozi reži sinusno in z eno samo valovno dolžino. Intenziteto valovanja zvoka v posameznih točkah bomo izračunali po postopku, ki je analogen tistemu za svetlobo (elektromagnetno valovanje), se pravi za jakost električnega polja v posamezni točki P na zaslonu (Halliday in drugi, 2004). V točki P torej iščemo velikost amplitude spremembe tlaka A. Posamezni val iz vsake reže zato zapišemo:

$$A_1 = A_0 \sin \omega t \quad \text{in} \quad A_2 = A_0 \sin (\omega t + \phi).$$

Čeprav je valovanje pred režami v fazi, je njihov fazni zamik v točki P odvisen od razlike poti; $\delta = r_1 - r_2 = d \sin \theta$. Zaradi razlike poti, dobimo fazni zamik med valoma ;

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta. \quad (14)$$

Ta enačba pove, kako se s kotom θ glede na simetralo med režama spreminja fazni zamik ϕ (slika 15).



Slika 15: Fazni zamik dveh valov iz dveh rež S_1 in S_2 v točki P na oddaljenem zaslonu.

Velikost amplitude spremembe tlaka v točki P, lahko izračunamo iz vsote obeh sinusnih valov:

$$A_p = A_1 + A_2 = A_0 [\sin(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t + \theta)],$$

od koder dobimo po enakem postopku kot pri enačbi (5) :

$$A_p = 2A_0 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\theta}{2}\right). \quad (15)$$

Dobljena enačba pove, da ima valovanje v točki P na zaslonu enako frekvenco in valovno dolžino kot pred režami, vendar je amplituda pomnožena s faktorjem $2 \cos(\theta/2)$. Če želimo preveriti skladnost tega rezultata z rezultatom iz prejšnjega poglavja (enačbi (10) in (11)), lahko preverimo, kje ima intenziteta minimum in kje maksimum. Upoštevamo, da če je $\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$, potem je amplituda zvočnega valovanja v točki P je $2A_0$, kar pa ustreza maksimumu interference. Prav tako, če je $\phi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$, potem je amplituda zvočnega valovanja v točki P enaka nič, kar ustreza minimumu interference oziroma oslabitvi valovanja.

Končno lahko dobimo izraz za intenziteto valovanja v poljubni točki P na zaslonu za dvojno režo. Ker je intenziteta valovanja sorazmerna s kvadratom amplitude spremembe tlaka (enačba 3), lahko zapišemo enačbo za intenziteto valovanja kot smo definirali v enačbi (15):

$$I \propto A_0^2 = 4A_0^2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin^2\left(\omega t + \frac{\theta}{2}\right). \quad (16)$$

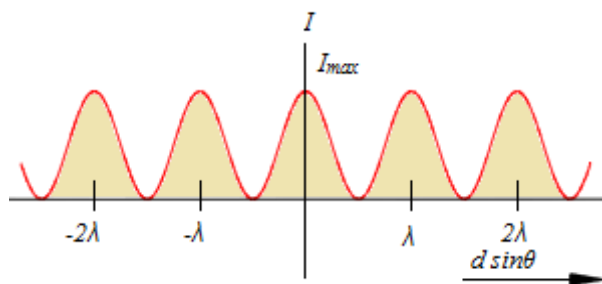
Tako lahko zapišemo, da je povprečna intenziteta zvočnega valovanja na zaslonu podana z:

$$I = I_{\max} \cos^2 \left(\frac{\phi}{2} \right). \quad (17)$$

Kjer je $I_{\max} = 4 A_0^2$ največja intenziteta zvočnega valovanja. Od tod dobimo odvisnost intenzitete zvoka od kota θ glede na smer vpadnega valovanja (smer simetrale med režama):

$$I = I_{\max} \cos^2 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right). \quad (18)$$

Grafično je intenziteta zvoka v odvisnosti od kota θ za dve ozki reži prikazana na sliki 16, za primer, ko je $d \ll L$ in da je vrednost θ majhna.



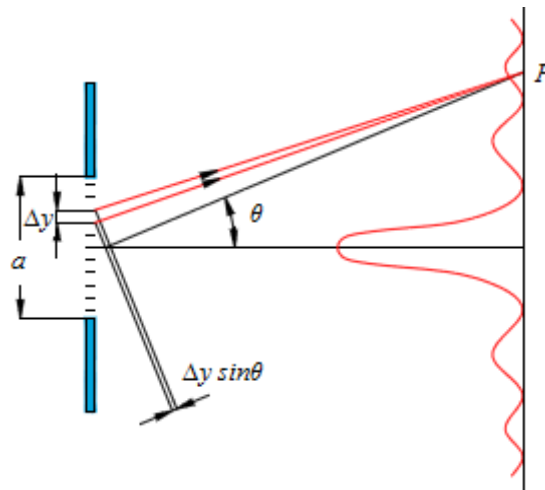
Slika 16: Graf intenzitete valovanja za dvema ozkima režama v odvisnosti od kota glede na smer simetrale med režama, pri izbrani razdalji med režama d .

4 INTERFERENCA VALOV ZA VEČ REŽAMI

Poglejmo podrobneje, kako se valovanje obnaša po prehodu skozi več širokih rež. Sistematično bomo pojav obravnavali za primer ene široke reže in nato še dve, tri, štiri, pet in šest širokih rež.

4.1 Uklon valovanja na široki reži

Za razlago uklona valovanja na eni široki reži bomo uporabili kazalčni diagram (Halliday in drugi, 2004). Predstavljajmo si, da je naša reža razdeljena na več ozkih rež, ena zraven druge. Skozi vsako od teh rež prehaja sinusno valovanje z eno samo valovno dolžino. V neki točki P na zaslonu vsak val, ki prehaja skozi naše namišljene ozke režice, prispeva k intenziteti valovanja v tej točki P. Slika 17 prikazuje pot valovanja skozi režice do točke P na zaslonu.



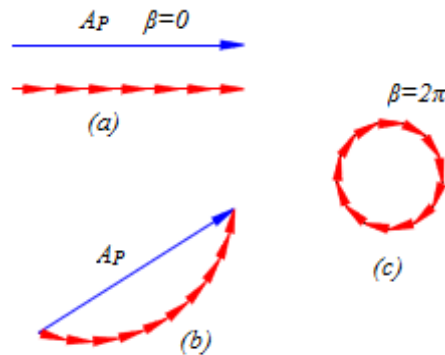
Slika 17: Vzorec uklona na široki reži.

Vsako valovanje, ki prehaja skozi namišljene režice in pride do opazovane točke, je v fazi zamaknjeno za $\Delta\beta$. S podobnim načinom za izračun jakosti valovanja smo se srečali pri Youngovem eksperimentu. Intenziteta valovanja je sorazmerna z velikostjo kvadrata amplitude spremembe tlaka (enačba (3)). V faznem diagramu so posamezni vektorji amplitude spremembe tlaka v fazi premaknjeni za kot $\Delta\beta$, ki ga izrazimo:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta y \sin \theta . \quad (19)$$

Če želimo najti velikost amplitude spremembe tlaka, v kateri koli točki na zaslonu in za vse vrednosti θ , moramo sešteti vse vektorje, ki predstavljajo amplitude spremembe tlaka ΔA , ki

jih prispevajo posamezne ozke reže po celotnem območju široke reže. Za male kote θ lahko domnevamo, da so vrednosti ΔA enake. Za predstavitev tega je najprimernejši fazni diagram, kot ga prikazuje slika 18b.



Slika 18: Fazni diagrami amplitude spremembe tlaka.

V našem primeru je amplituda spremembe tlaka v točki P na zaslonu A_P vektorska vsota vseh ΔA iz vseh režic Δy . Kot je prikazano na sliki 18b, je vrednost A_P tetiva loka, ki jo tvorijo posamezni vektorji ΔA . Popolna fazna razlika β med zgornjim in spodnjim delom reže je:

$$\beta = N\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} N\Delta y \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta, \text{ ker je}$$

$a = N\Delta y$, kar je širina reže.

Slika 18a prikazuje, kako vsi vektorji ΔA iz posameznih režic tvorijo najdaljšo vsoto A_P , ko je kot θ enak nič. V tem položaju se nahaja središče ojačitve. Slika 18c prikazuje vsoto vseh vektorjev ΔA , kjer je zaradi zajetega kota 2π vektor A_P zopet na izhodiščni točki, torej enak nič. Zato lahko zapišemo $\beta = N\Delta\beta = 2\pi$ in vidimo:

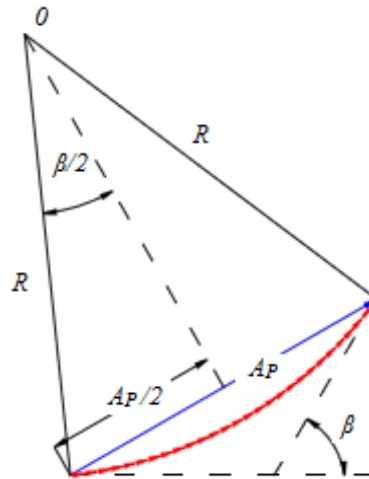
$$2\pi = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta_{\min}, \text{ torej je}$$

$$\sin \theta_{\min} = \frac{\lambda}{a}.$$

To pomeni, da se prvi minimum interference pojavi, ko je $\sin\theta_{\min} = \lambda/a$ in vsaki naslednji pri kotih:

$$\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{a}, \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots). \quad (20)$$

Sedaj lahko ponazorimo velikost spremembe amplitude tlaka in jakosti interference za vsako točko na zaslonu. V našem primeru, kot ga prikazuje slika 17, lahko vse Δy zmanjšamo na zelo majhne dele (dy) in dobimo zelo veliko število zelo ozkih rež N . Ko seštejemo vse infinitezimalne vektorje dA , dobimo velikost vektorja A_p , tako kot nam prikazuje slika 19.



Slika 19: Kazalčni diagram za izračun spremembe amplitude tlaka na eni široki reži.

Tako lahko izračunamo velikost spremembe amplitude tlaka in intenzitete valovanja v vsaki točki na zaslonu. Iz trikotnika, ki vsebuje kot $\beta/2$ vidimo, da velja:

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{A_p/2}{R},$$

kjer R je radij loka. Dolžina loka je produkt $R\beta$, kjer se kot β meri v radianih. Združitev teh podatkov s prejšnjimi nam da izraz:

$$A_p = 2R \sin \frac{\beta}{2} = 2 \left(\frac{A_0}{\beta} \right) \sin \frac{\beta}{2} = A_0 \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right].$$

Intenziteta valovanja je torej podana z:

$$I = I_{\max} \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right]^2, \quad (21)$$

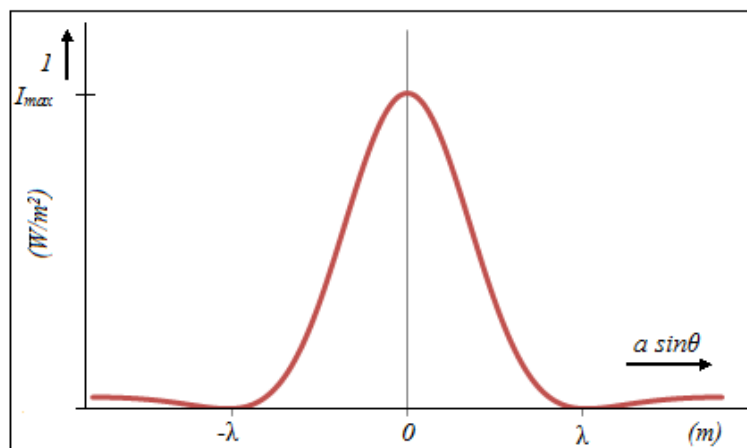
kjer je I_{\max} intenziteta valovanja pri kotu $\theta = 0$ (to je v centralnem maksimumu). Če

upoštevamo: $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$,

dobimo izraz, ki nam opiše intenziteto uklonjenega valovanja za eno široko režo:

$$I = I_{\max} \left[\frac{\sin(\pi a \sin \theta / \lambda)}{\pi a \sin \theta / \lambda} \right]^2. \quad (22)$$

Rezultat je grafično prikazan na sliki 20. Enačba (20) podaja mesto prvega uklonskega minimuma (uklonski minimumi se pojavljajo ob vseh celih vrednostih valovne dolžine). Če je reža večja od valovne dolžine valovanja, je steber prvega uklonskega maksimuma ožji, če pa je reža ožja od valovne dolžine valovanja, se reža obnaša podobno, kot da je izvor valovanja in nimamo uklonskih minimumov.



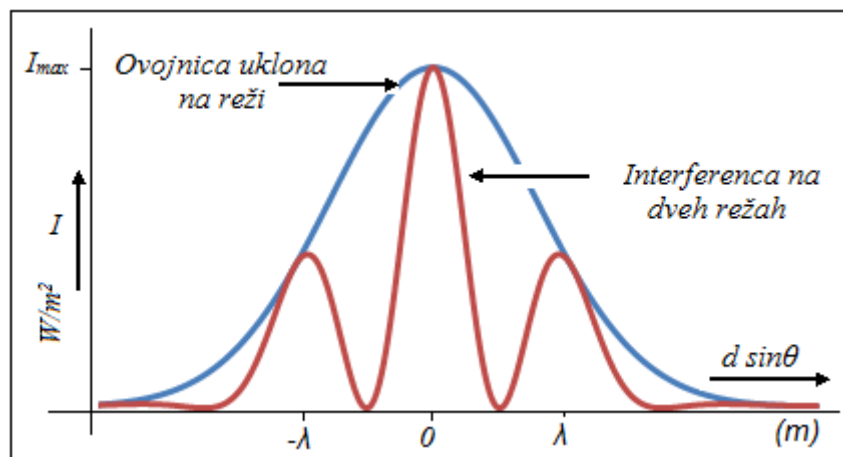
Slika 20: Prikaz porazdelitve jakosti valovanja za eno režo. Kot vidimo je največja jakost I_{\max} pri kotu $\theta=0$.

4.2 Intenziteta valovanja pri interferenci za dvema širokima režama

Ko imamo prisotni dve ali več širokih rež, nimamo opravka samo z uklonom zvoka na eni reži, ampak hkrati z interferenco valovanj iz več rež. V primeru dveh rež na zaslon prihajata dve različni valovanji, ki sta posledica uklona na vsaki posamezni reži. Valovanji, ki prihajata iz posameznih rež, interferirata. Intenziteto valovanja na zaslonu opišemo s produktom dveh enačb (18) in (22), ki smo jih že obravnavali v prejšnjih poglavjih:

$$I = I_{\max} \cos^2 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) \left[\frac{\sin(\pi a \sin \theta / \lambda)}{\pi a \sin \theta / \lambda} \right]^2. \quad (23)$$

Enačba podaja intenziteto valovanja za dvema širokima režama širine a , ki sta razmaknjeni za razdaljo d . Grafično si rezultat lahko prestavljamo kot interferenčno sliko za dve ozki reži $\cos^2(\pi d \sin \theta / \lambda)$, kjer intenziteto stranskih maksimumov določa ovojnica, ki je podana z intenziteto uklona valovanja na eni široki reži $[\sin(\pi a \sin \theta / \lambda) / (\pi a \sin \theta / \lambda)]^2$.



Slika 21: Graf intenzitete interference valovanja na dveh širokih režah (rdeča črta). Opazimo centralni primarni maksimum in dva stranska primarna maksimuma. Z modro črto je narisana ovojnica interferenčne slike, ki je posledica uklona na širokih režah.

Širjenje reže povzroča na grafu zmanjševanje vrednosti obeh primarnih maksimumov prvega reda, medtem ko z večanjem razdalje med režami, povzročamo manjšanje razmika med primarnimi maksimumi in seveda posledično večje število primarnih maksimumov skladno z enačbo (10). Če bi opazovali enake reže z enako razdaljo med režami pri valovanju z manjšo valovno dolžino, bi opazili, da se podobno obnaša, kot v primeru, ko večamo širino reže in razmik med režami.

4.3 Intenziteta valovanja za tremi širokimi režami

Interferenčno sliko valovanja za tremi režami dobimo na podoben način kot za dve reži. Pomagamo si s faznim diagramom, da bi našli intenziteto valovanja v smeri θ (slika 22):

$$A \sin(a + \delta) = A_0 \sin a + A_0 \sin(a + \delta) + A_0 \sin(a + 2\delta) \text{ za } a = \omega t \text{ in } \delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta.$$

Za izračun amplitude v točki P seštejemo projekcije posameznih amplitud valovanja iz posameznih rež:

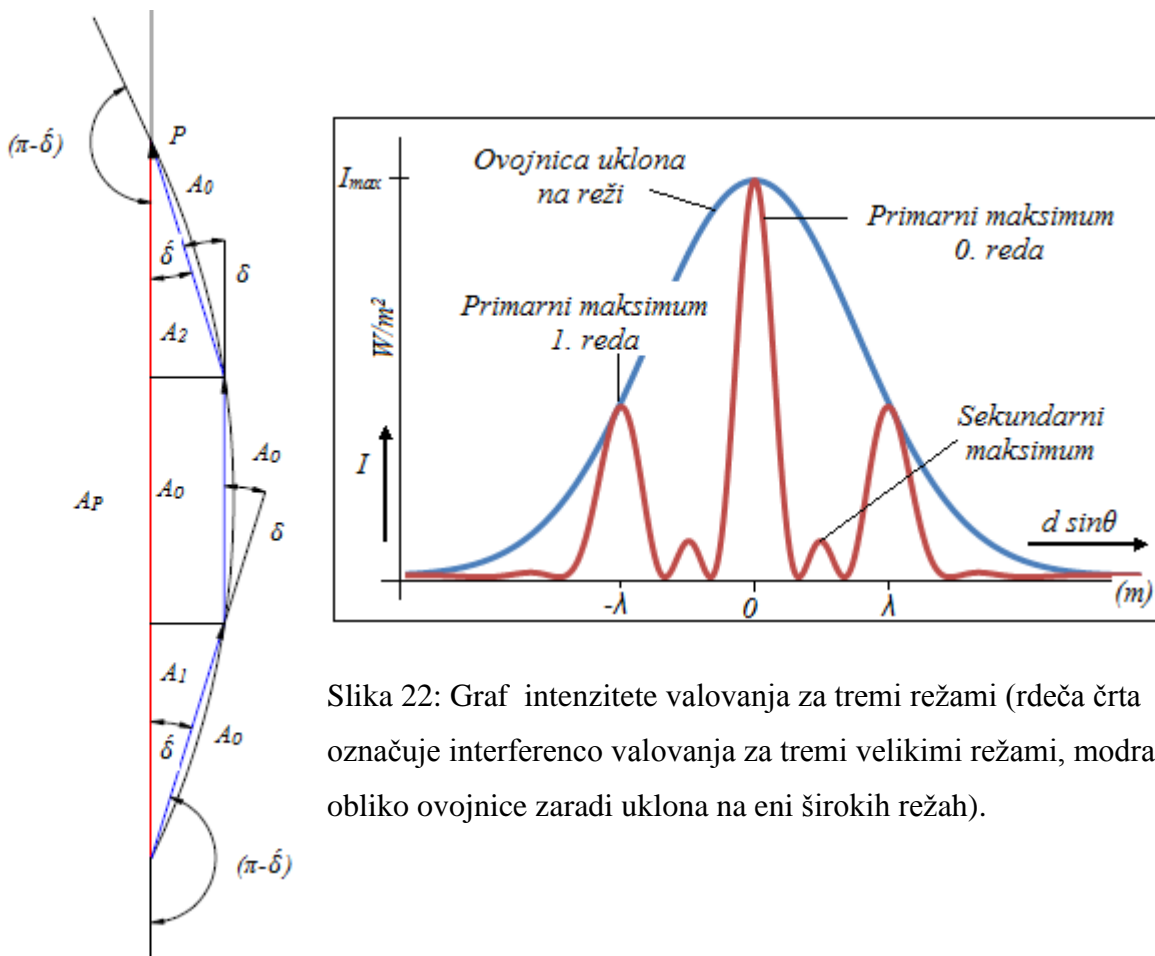
$$A_p = A_1 + A_0 + A_2, \text{ kjer je } A_1 = A_2,$$

$$A_p = 2A_1 + A_0, \text{ kjer je } \delta = \delta \text{ in } A_1 = A_0 \cos \delta, \text{ zato je } A_p = A_0(2 \cos \delta + 1).$$

Od tod dobimo enačbo za intenziteto, pri čemer upoštevamo še faktor, ki je posledica končne širine posamezne reže:

$$I = I_{\max} \left[\frac{\sin(\pi a \sin \theta / \lambda)}{\pi a \sin \theta / \lambda} \right]^2 \left[2 \cos \left(\frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) + 1 \right]^2, \quad (24)$$

kjer je $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$, in $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$.



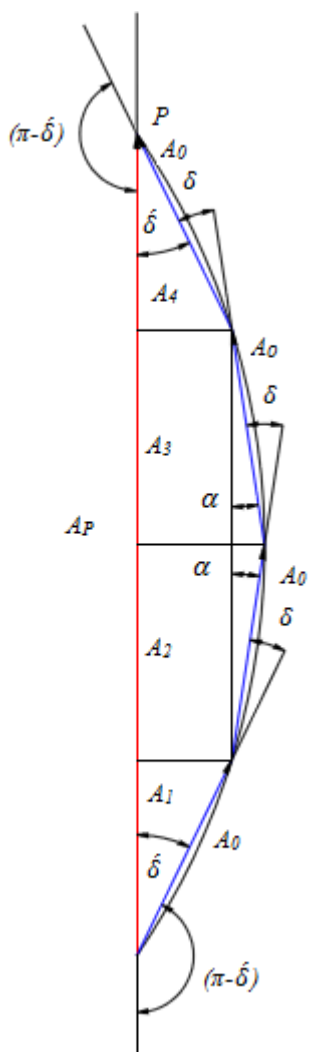
Slika 23: Kazalčni diagram amplitude spremembe tlaka za tremi režami.

Širina reže a , razdalja med režami d in valovna dolžina λ so tudi tu v enakem razmerju, kot v primeru interference na dveh režah, opisanem pod sliko 21.

Slika 23 prikazuje graf zvočnega valovanja za tremi režami. Na sredini vidimo centralni maksimum in naslednja dva primarna maksimuma na razdaljah $+\lambda$ in $-\lambda$. Opazimo, da se pojavi med primarnimi maksimumu tudi manjši, sekundarni maksimum. Primarni maksimumi so ožji, kot v primeru dveh rež.

4.4 Intenziteta valovanja za štirimi širokimi režami

Intenziteta interference valovanja za štirimi režami poiščemo podobno kot v prejšnjih primerih. Najprej s pomočjo kazalčnega diagrama dobimo vsoto amplitude spremembe tlaka v točki P, pri poljubnem kotu θ .



Slika 24 ponazarja vsoto amplitud v točki za rezo. Amplitude interference je vsota projekcij primarnih amplitud ultrazvoka. Ker imamo štiri reže, je amplituda interference vsota štirih osnovnih amplitud valovanja ultrazvoka.

$A_p = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$, kjer velja, da je $A_1 = A_4$ in $A_2 = A_3$. Poiščemo še povezavo med koti $\hat{\delta}$, δ in α :

$\hat{\delta} = \delta + a$, torej je $a = \hat{\delta} - \delta = \delta/2$ in $2(\pi - \hat{\delta}) + 3\delta = 2\pi$, torej je $\hat{\delta} = 3\delta/2$. In zapišemo enačbo: $A_p = 2A_1 + 2A_2$ in ker je

$A_1 = A_0 \cos \hat{\delta}$ ter $A_2 = A_0 \cos \alpha$, dobimo:

$A_p = 2A_0 \cos \hat{\delta} + 2A_0 \cos \alpha$, $A_p = 2A_0 (\cos 3/2\delta + \cos 1/2\delta)$ in za

vrednosti δ velja $\delta = \frac{2\pi \sin \theta}{\lambda}$, tako dobimo:

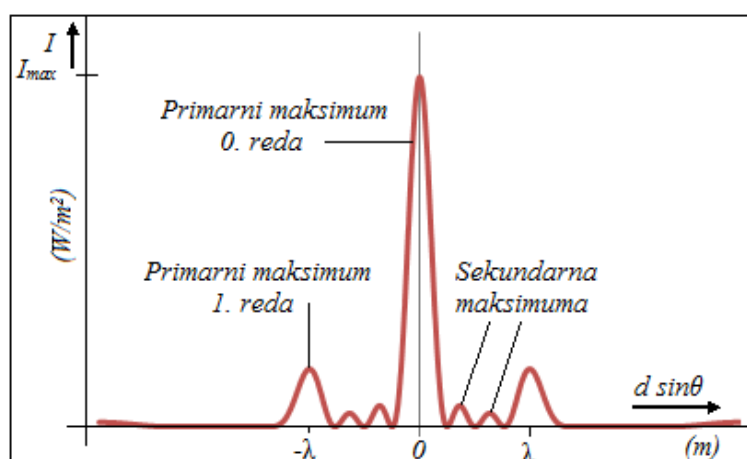
$$A_p = 2A_0 \left(\cos \frac{3\pi d \sin \theta}{\lambda} + \cos \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right).$$

Slika 24: Kazalčni diagram amplitude spremembe tlaka za štirimi režami.

Intenziteta valovanja je sorazmerna s kvadratom amplitude, in če v enačbi upoštevamo še uklon valovanja na široki reži, dobimo:

$$I = I_{\max} \left[\frac{\sin(\pi a \sin \theta / \lambda)}{\pi a \sin \theta / \lambda} \right]^2 \left[\cos\left(\frac{3\pi d \sin \theta}{\lambda}\right) + \cos\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right) \right]^2, \quad (25)$$

kjer je $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$, in $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$.



Slika 25: Graf intenzitete valovanja za štirimi režami.

Slika 25 prikazuje graf intenzitete valovanja za štirimi režami na oddaljenem zaslonu. Med primarnimi maksimumi se pojavita dva sekundarna. Širina sekundarnih maksimumov se manjša z večjim številom rež.

4.5 Intenziteta valovanja za petimi širokimi režami

Intenziteto valovanja za petimi režami predstavimo kot v prejšnjih primerih. S pomočjo kazalčnega diagrama (slika 26) poiščemo vsoto amplitude spremembe tlaka valovanja v točki P, pri poljubnem kotu θ .

$$A_p = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5. \text{ kjer velja, da je } A_1 = A_5 \text{ in } A_2 = A_4.$$

Poiščemo povezave med koti δ , δ in α : $\delta = \delta + \alpha$ in $\delta = 2\delta$, torej je $\alpha = \delta - \delta = \delta$.

Zapišemo enačbo: $A_p = 2A_1 + 2A_2 + A_0$, kjer je $A_1 = A_0 \cos \delta$ in $A_2 = A_0 \cos \alpha$, dobimo:

$$A_p = 2A_0 \cos \delta + 2A_0 \cos \alpha + A_0, \text{ vstavimo kot } \delta \text{ in dobimo:}$$

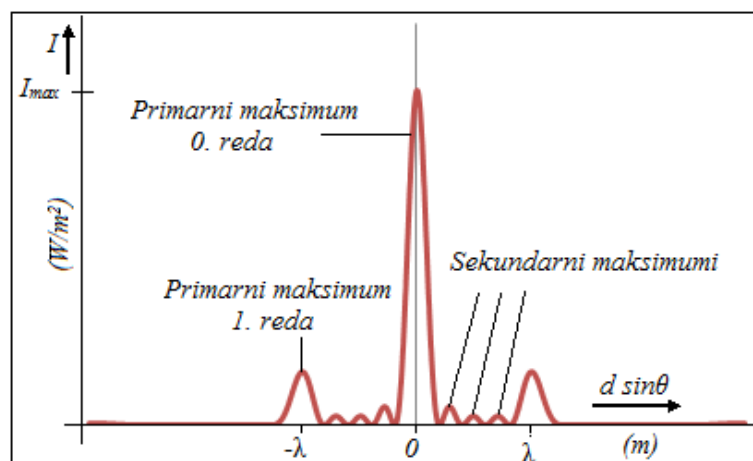
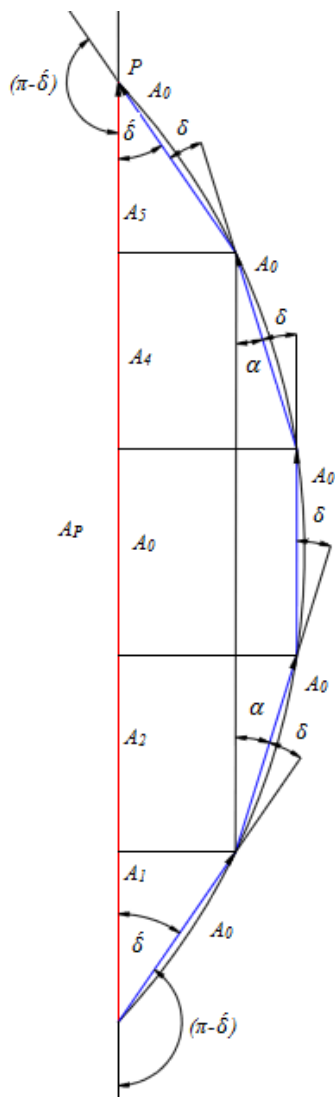
$A_p = A_0(2 \cos 2\delta + 2 \cos \delta + 1)$, za vrednost δ velja $\delta = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda}$, tako dobimo:

$$A_p = A_0 \left(2 \cos \frac{4\pi d \sin \theta}{\lambda} + 2 \cos \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} + 1 \right).$$

Intenziteta valovanja je sorazmerna s kvadratom amplitude spremembe tlaka. Upoštevamo še uklon valovanja za enojno režo in dobimo:

$$I = I_{\max} \left[\frac{\sin(\pi a \sin \theta / \lambda)}{\pi a \sin \theta / \lambda} \right]^2 \left[2 \cos \left(\frac{4\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) + 2 \cos \left(\frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) + 1 \right]^2, \quad (26)$$

kjer je $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$ in $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$.



Slika 26: Graf intenzitete valovanja za petimi režami na oddaljenem zaslonu.

Na sliki 26 je prikazana uklonska slika valovanja na petih režah. Poleg centralnega maksimuma opazimo maksimume prvega reda in med njimi po tri sekundarne maksimume.

Slika 27: Kazalčni diagram amplitude spremembe tlaka za petimi režami.

4.6 Intenziteta valovanja za šestimi širokimi režami

V tem poglavju si bomo ogledali še intenziteto valovanja za šestimi režami. Izpeljava enačbe tudi tu temelji na kazalčnem diagramu (slika 29), kjer iščemo vsoto amplitude spremembe tlaka v nekem poljubnem kotu θ .

$$A_p = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6, \text{ kjer velja, da je } A_1 = A_6, A_2 = A_5, A_3 = A_4.$$

Najti moramo povezave med koti δ , δ , α in γ :

$$\delta = \delta + \alpha, \quad \delta = 2\delta + \gamma \quad \text{in} \quad \alpha = \delta + \gamma, \text{ kjer velja } 2(\pi - \delta) + 5\delta = 2\pi, \text{ zato je } \delta = 5\delta/2,$$

$$\gamma = 5\delta/2 - 2\delta = \delta/2 \quad \text{in} \quad \alpha = 3\delta/2. \quad \text{Sedaj lahko zapišemo:}$$

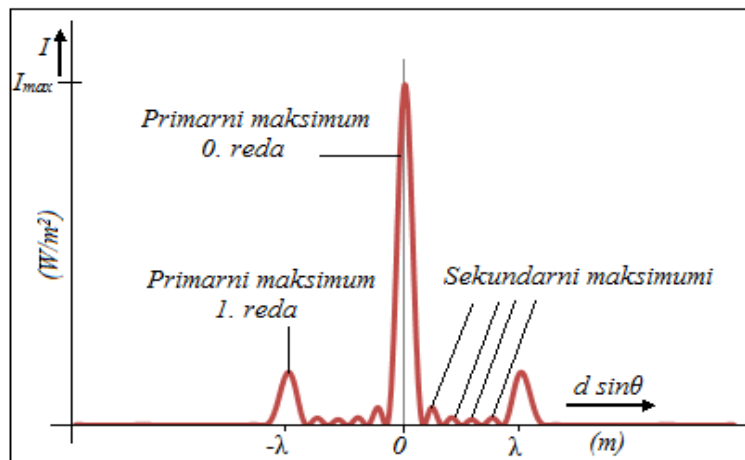
$$A_p = 2A_1 + 2A_2 + 2A_3 = 2A_0 \cos \delta + 2A_0 \cos \alpha + 2A_0 \cos \gamma,$$

$$A_p = 2A_0 \left(\cos \frac{5}{2}\delta + \cos \frac{3}{2}\delta + \cos \frac{1}{2}\delta \right) \text{ in sedaj, če upoštevamo, da je } I \propto A_p^2 \text{ in}$$

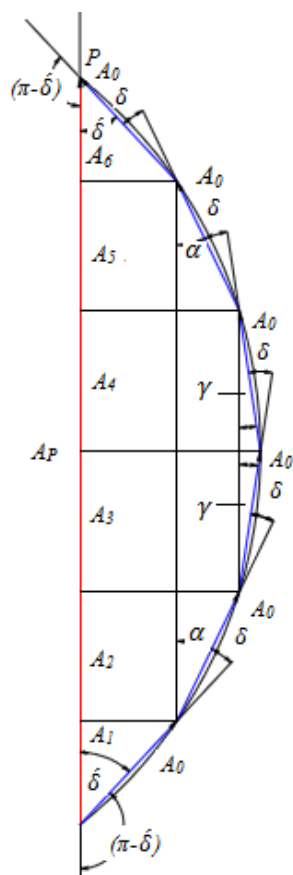
$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta, \text{ potem je:}$$

$$I = I_{\max} \left[\frac{\sin(\pi a \sin \theta / \lambda)}{\pi a \sin \theta / \lambda} \right]^2 \left[\cos \left(\frac{5\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) + \cos \left(\frac{3\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) + \cos \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) \right]^2, \quad (27)$$

$$\text{kjer je } \beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta \text{ in } \delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta.$$



Slika 28: Graf intenzitete valovanja za šestimi režami.



Slika 29: Kazalčni diagram amplitude spremembe tlaka za šestimi režami.

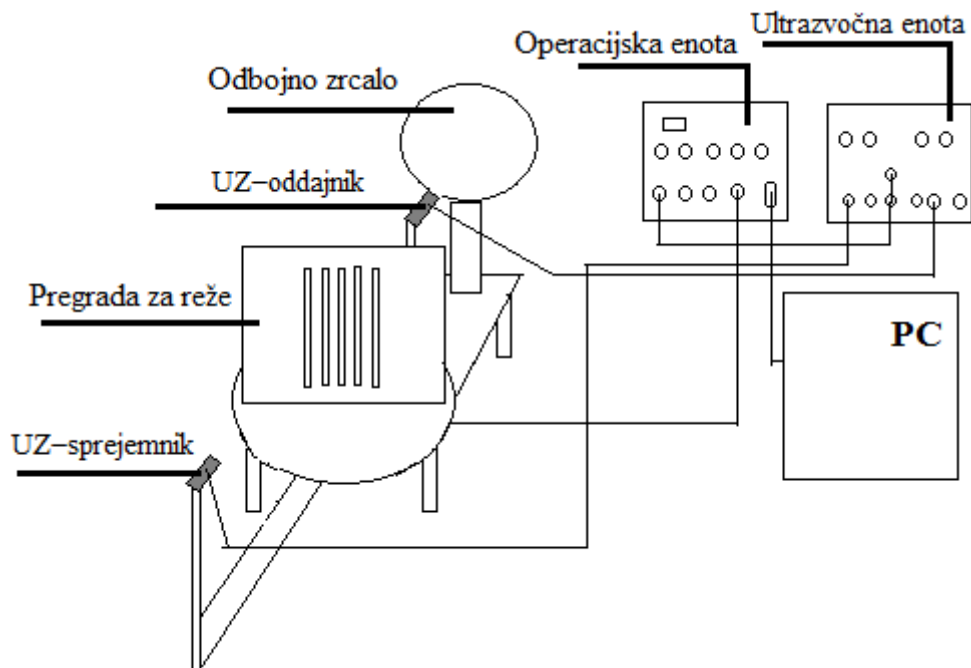
Na sliki 29 je prikazana uklonska slika valovanja na šestih režah. Širina centralnega maksimuma in maksimumov prvega reda se oža z večjim številom rež, lege maksimumov pa ostanejo na istih mestih. Med glavnimi maksimumi, so štirje sekundarni maksimumi, ki postajajo čedalje šibkejši, z večanjem števila rež.

5 MERITVE

Za izvedbo meritve intenzitete valovanja pri uklonu in interferenci ultrazvoka na režah smo uporabili merilni sistem, ki je prikazan na sliki 30. Sestavljajo ga goniometer z odbojnim zrcalom, operacijska enota, ki upravlja gibanje goniometra, ultrazvočni oddajnik in sprejemnik z ultrazvočno enoto, reže in osebni računalnik za zajemanje in prikaz podatkov.

Ultrazvočno valovanje ustvarja ultrazvočni oddajnik, ta je usmerjen proti konkavnemu zrcalu in je nameščen v fokus pred konkavnim zrcalom. Na ta način dobimo po odboju od zrcala ravne valove, ki so usmerjeni na reže. Ultrazvočno valovanje, ki prehaja skozi reže, detektira ultrazvočni sprejemnik premera 5 mm. Pritrjen je na vrtljivi roki, ki se vrti okrog centra mize goniometra, na katero so postavljene reže. Na mizi goniometra je postavljen okvir za reže, v katerega ustavljamo različne reže. Pripomočki za sestavo reže so kovinske plošče različnih dimenzij, pa tudi plošče z že izdelanimi režami. Ultrazvočni sprejemnik in oddajnik sta povezana z ultrazvočno enoto, ta pa z operacijsko enoto goniometra, ki krmili zajemanje podatkov med meritvijo.

Operacijska enota goniometra krmili roko sprejemnika, tako da lahko avtomatsko spreminjamo kot roke, na katero je montiran sprejemnik. Na ta način izmerimo intenziteto ultrazvoka za režami v razponu kotov od -90 do 90 stopinj, glede na vpadno smer valovanja.



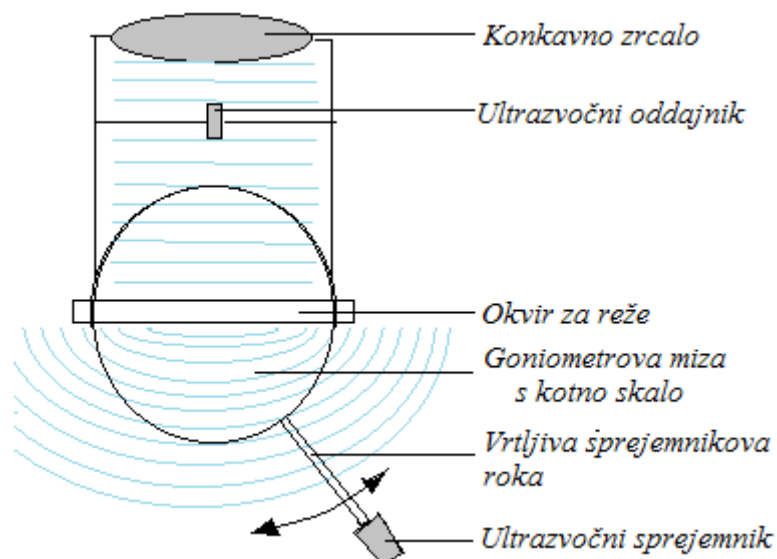
Slika 30: Shematični prikaz postavitve eksperimenta za merjenje uklona ultrazvoka na režah.

Operacijska enota ima tudi priključek za povezavo z osebnim računalnikom, kjer izmerjene podatke posreduje do osebnega računalnika. S pomočjo programske opreme lahko dobljene podatke prikažemo v obliki grafa in v tabelarični obliki.



Slika 31: Fotografija eksperimenta za merjenje uklona ultrazvoka na režah.

Za uspešno izvedbo eksperimenta je potrebno natančno usmeriti konkavno zrcalo proti režam. Oddajnik ultrazvoka moramo postaviti natančno v gorišče konkavnega zrcala. Oddajnik ultrazvočnega valovanja in sprejemnik ultrazvočnih valov moramo usmeriti natančno v center konkavnega zrcala. Ko namestimo pregrado z režami, nataknejo na okvir rež še pregrado za dušenje zvočnega valovanja, s katerim dušimo valovanja, ki ne padajo direktno na reže ter posledično imamo manj motenj zaradi sipanja zvočnega valovanja iz okolice. Podrobneje bomo sestavo in umerjanje pojasnili v navodilih za pripravo eksperimenta (priloga). Poglejmo shemo elementa za izvedbo meritve.



Slika 32: Tloris goniometra.

Za primer vzemimo meritev uklona ultrazvočnega valovanja z valovno dolžino 8,6 mm na dveh širokih režah. V pregrado za reže vstavimo ploščo z režama. Pregrada ima milimetrski trak, tako lahko natančno namestimo širino rež in razmik med njima. V našem primeru smo izbrali dve reži s širino $a = 11$ mm in razmikom med njima $d = 41$ mm. Na osebni računalniku določimo želeni razpon kotov merjenja intenzitete ultrazvoka za režama. Meril bom med kotoma $+90^\circ$ in -90° po korakih 1 stopinje. Dobljen spekter intenzitete ultrazvoka v odvisnosti od kota je prikazan na sliki 33(modra črta).

Iz enačbe (10) izračunamo kote ojačitev za ta primer interference:

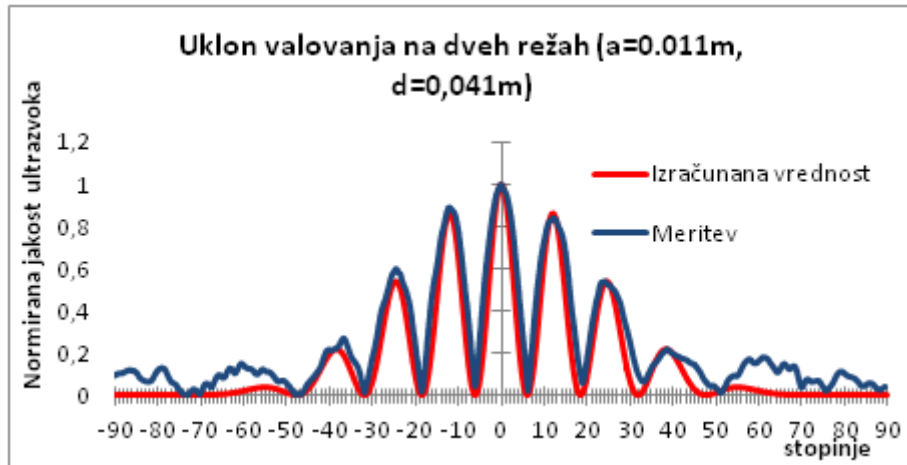
$$\theta_0 = 0, \theta_1 = \pm 12,1^\circ, \theta_2 = \pm 24,8^\circ, \theta_3 = \pm 39^\circ, \theta_4 = \pm 57^\circ.$$

S pomočjo enačbe (11) pa dobimo kote oslabitev interference:

$$\theta_0 = \pm 6^\circ, \theta_1 = \pm 18,3^\circ, \theta_2 = \pm 31,6^\circ, \theta_3 = \pm 47,2^\circ, \theta_4 = \pm 70,7^\circ.$$

Iz slike 33 vidimo, da koti ojačitev in oslabitev interference povsem sovpadajo s teoretičnimi izračuni.

Izmerjene vrednosti intenzitete sipanega valovanja za režama primerjamo s teoretično napovedjo (slika 33, rdeča črta), ki jo podaja enačba (23).



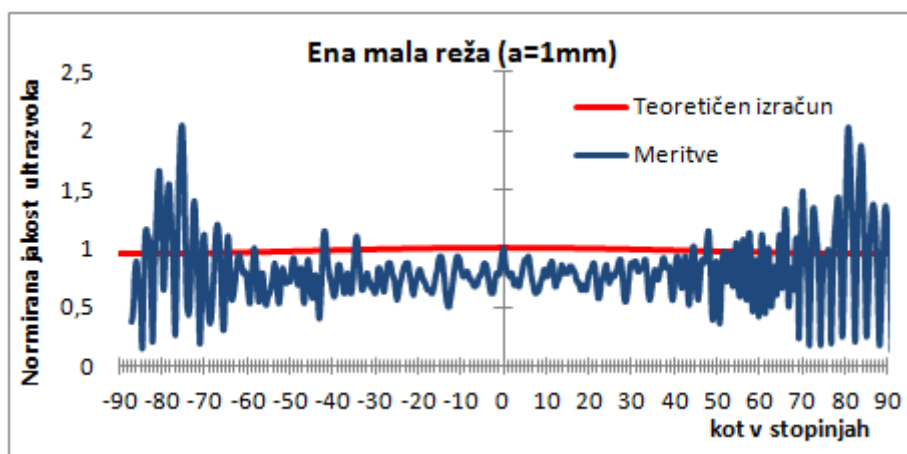
Slika 33: Graf primerjave teoretične interference ultrazvočnega valovanja za dvema velikima režama s praktično meritvijo.

Vidimo, da se teoretično izračunan spekter tesno prilega izmerjenemu spektru intenzitete ultrazvoka v odvisnosti od kota za dvema režama širine 11 mm in razdalje med režami 41 mm. Pri večjih kotih opazimo v izmerjenem spektru šum, ki je posledica sipanja ultrazvoka v okolici merilne naprave.

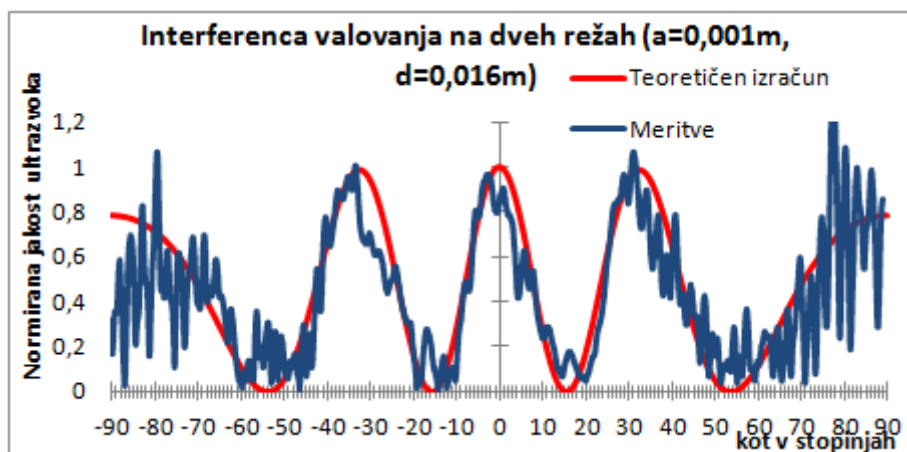
Na podoben način opravimo meritve intenzitete zvočnega valovanja za ozkimi režami širine $a=1\text{mm}$ (ožje od valovne dolžine) razmaknjenimi za $d=16\text{mm}$ in širokimi režami širine $a=11\text{mm}$ (širše od valovne dolžine) razmaknjenimi za $d=16\text{mm}$. Meritve izvedemo za primere interference zvočnega valovanja za dvema, tremi, štirimi, petimi in šestimi ozkimi in širokimi režami. Rezultati in analize meritev so predstavljene v naslednjem poglavju.

6 ANALIZA

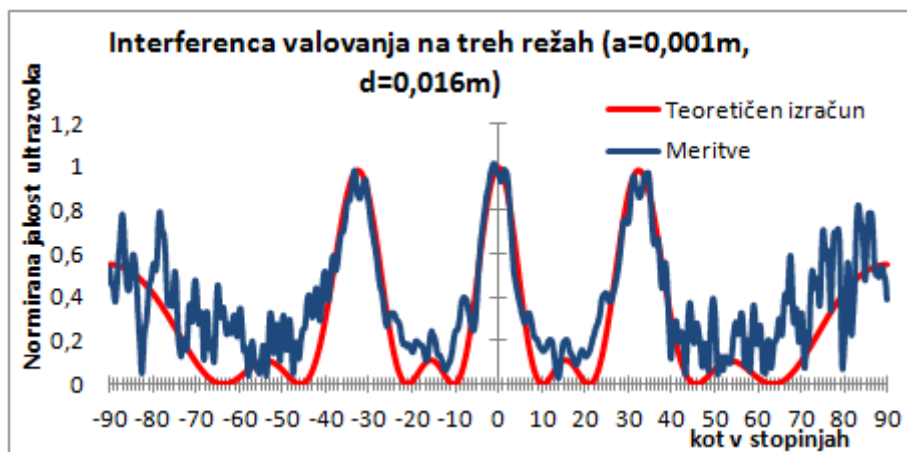
Vse meritve uklona valovanja ultrazvoka na eni reži in interferenco valovanja na dveh, treh štirih, petih in šestih režah smo izvedli z ultrazvokom s frekvenco 40 kHz in z valovno dolžino $\lambda = 8,6$ mm ter razdaljo med režami 16 mm. Najprej poglejmo rezultate interference na ozkih režah širine $a = 1$ mm, nato pa še rezultate na širokih režah z $a = 11$ mm. Primerjali bomo izmerjene vrednosti s teoretičnimi izračuni. Vse meritve intenzitete uklonjenega ultrazvočnega valovanja smo merili v razponu kotov od -90° do $+90^\circ$. Meritve na ozkih režah so prikazane grafično na slikah od 34 do 39. V vseh primerih je intenziteta valovanja normirana na izmerjeno vrednost pri kotu 0 stopinj.



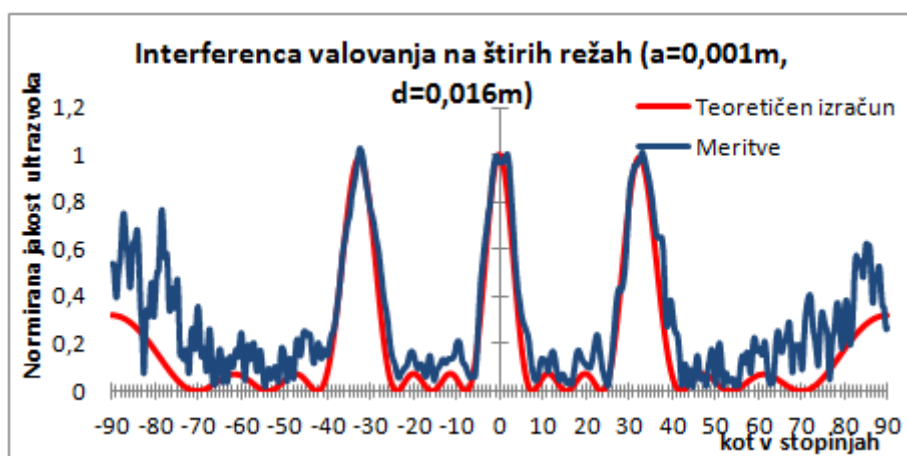
Slika 34: Uklon ultrazvočnega valovanja na reži širine 1 mm.



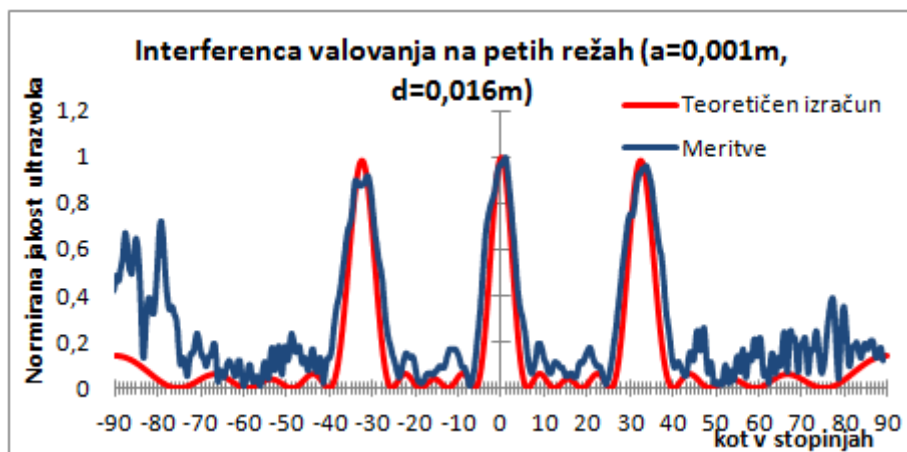
Slika 35: Interferenca valovanja na dveh režah širine 1 mm, razmahnjenih za 16 mm.



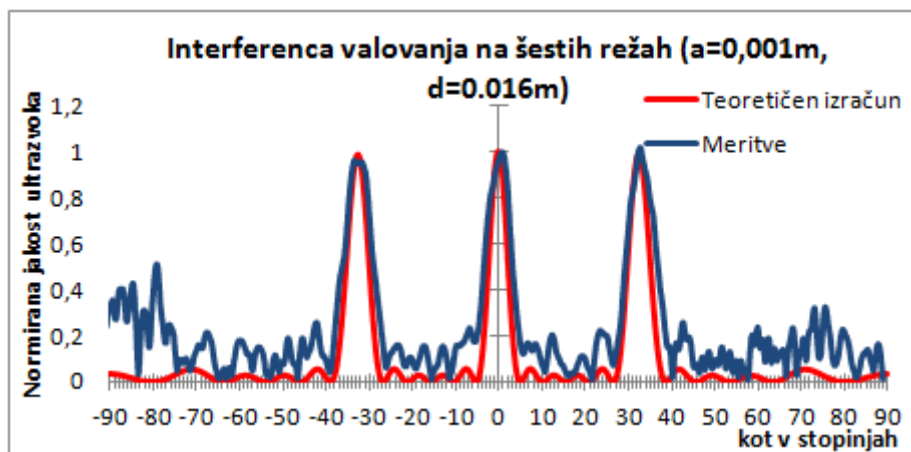
Slika 36: Interferenca valovanja na treh režah širine 1 mm, razmaknjenih za 16 mm.



Slika 37: Interferenca valovanja na štirih režah širine 1 mm, razmaknjenih za 16 mm.



Slika 38: Interferenca valovanja na petih režah širine 1 mm, razmaknjenih za 16 mm.



Slika 39: Interferenca valovanja na šestih režah širine 1 mm, razmaknjenih za 16 mm.

Slika 34 prikazuje intenziteto uklonjenega valovanja na eni reži. Reža zaradi svoje ozkosti deluje kot točkast izvor valovanja, zato nima maksimumov niti minimumov. Intenziteta je enakomerno porazdeljena v okolici ne glede na kot širjenja. Teoretičen izračun je narejen po enačbi (22). Na slikah od 35 do 39 vidimo, da se oslabitve pri interferenci pojavljajo pri kotih, ki jih napoveduje enačba (11):

$$\theta_0 = \pm 15,6^\circ, \text{ in } \theta_1 = \pm 53,7^\circ.$$

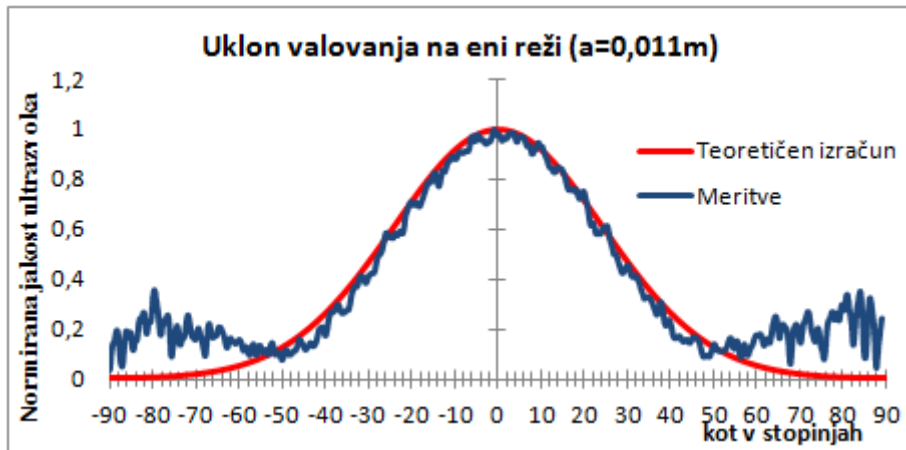
Tudi koti, pri katerih se pojavljajo primarni maksimumi, se ujemajo z napovedanimi po enačbi (10):

$$\theta_0 = 0, \text{ in } \theta_1 = \pm 32,5^\circ.$$

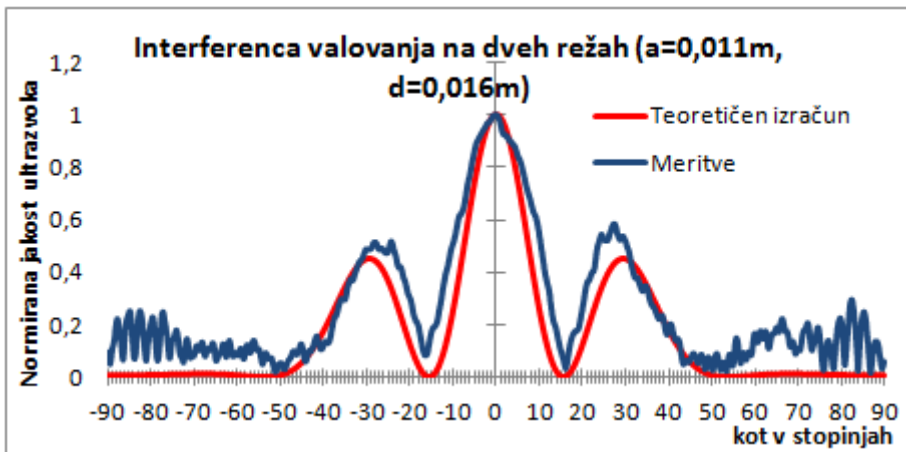
Teoretični izračuni intenzitete v odvisnosti od kota se povsod ujemajo z izmerjenimi vrednostmi po ustrezni enačbi (23), (24), (25), (26) oziroma (27).

Na vseh izmerjenih spektrih opazimo prisotnost relativno velikega šuma, kar je posledica ozkih rež, ki prepuščajo malo ultrazvočnega valovanja. Največji šum opazimo pri velikih kotih, kjer je prisotno veliko sipanega ultrazvoka iz okolice. Opazimo lahko, da se z večanjem števila rež oža širina primarnih maksimumov. Splošno ujemanje je dobro tudi s teoretično napovedjo za odvisnost intenzitete zvoka v primarnih maksimumih, ki je pri ozkih režah konstantna. Vsi maksimumi imajo enako intenziteto.

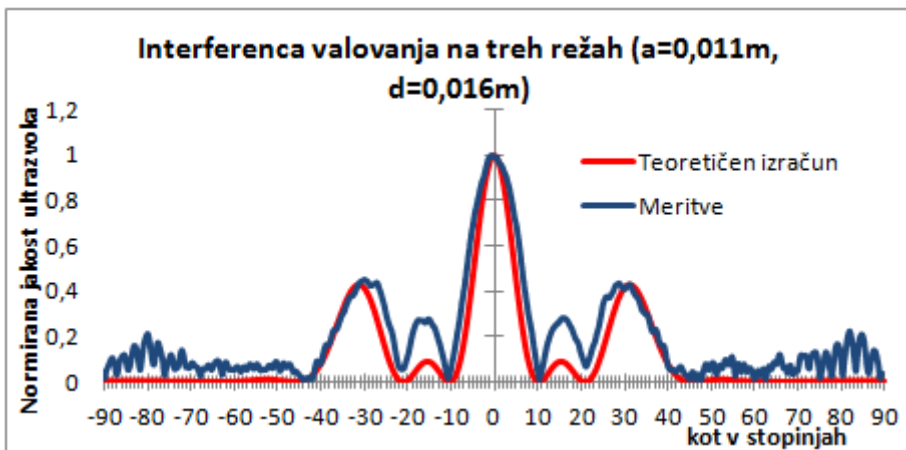
Oglejmo si še uklon in interferenco ultrazvočnega valovanja na širokih režah širine 11 mm. Meritve so prikazane grafično na slikah 40 do 45. Tudi tu je v vseh primerih intenziteta valovanja normirana na izmerjeno vrednost pri kotu 0 stopinj.



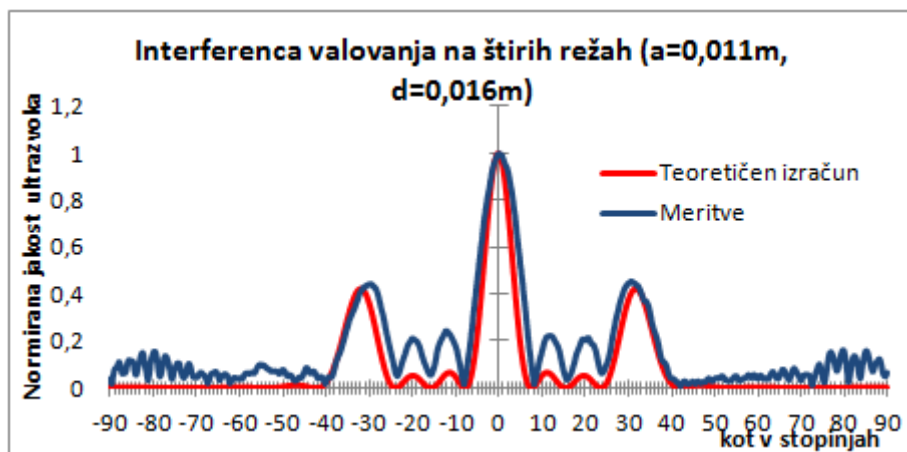
Slika 40: Uklon valovanja na eni reži širine 11 mm.



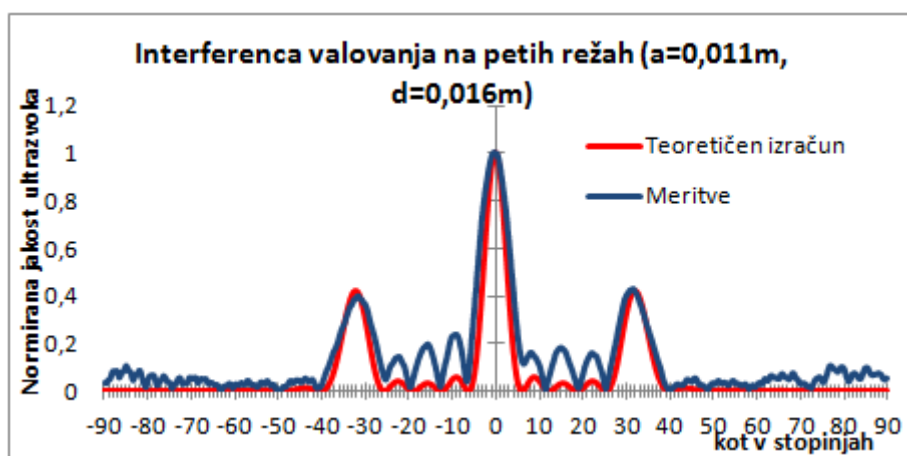
Slika 41: Interferenca valovanja na dveh režah širine 11 mm, razmahnjenih za 16 mm.



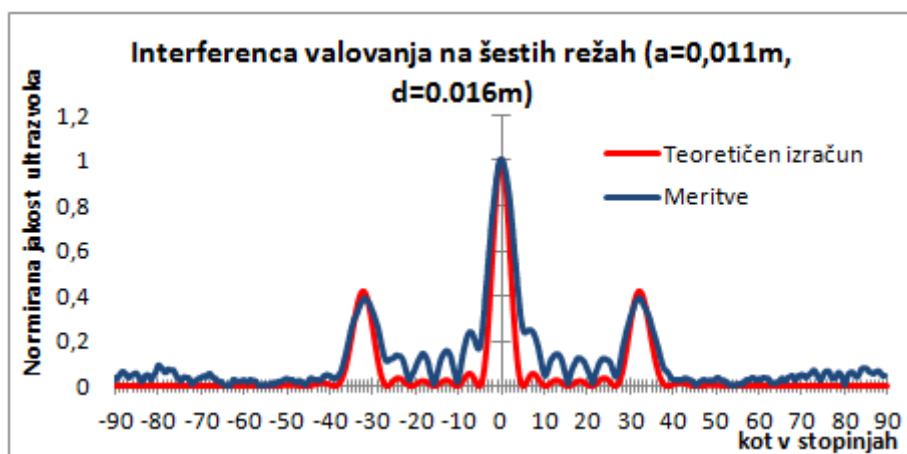
Slika 42: Interferenca valovanja na treh režah širine 11 mm, razmahnjenih za 16 mm.



Slika 43: Interferenca valovanja na štirih režah širine 11 mm, razmaknjenih za 16 mm.



Slika 44: Interferenca valovanja na petih režah širine 11 mm, razmaknjenih za 16 mm.



Slika 45: Interferenca valovanja na šestih režah širine 11 mm, razmaknjenih za 16 mm.

Na sliki 40 je prikazan z modro črto spekter uklona na eni reži. Teoretični izračun je narejen po enačbi (22). Vidimo, da je ujemanje teoretične napovedi z meritvami zelo dobra. Oslabitev

intenzitete se pojavi pri kotu, ki ga napove enačba (20). Upoštevali smo, da je valovna dolžina ultrazvoka 8,6 mm:

$$\theta = 51,4^\circ.$$

Na slikah od 41 do 45 vidimo primerjavo med meritvami in teoretičnim izračunom za interferenco valovanja na dveh, treh, štirih, petih in šestih režah širine 11 mm, ki so razmaknjene za 16 mm.

Lege oslabitev se ujemajo z napovedmi po enačbi (11):

$$\theta_0 = \pm 15,6^\circ, \text{ in } \theta_1 = \pm 53,7^\circ.$$

Prav tako se ujemajo lege maksimumov interference s teoretično napovedjo po enačbi (10):

$$\theta_0 = 0, \text{ in } \theta_1 = \pm 32,5^\circ.$$

Intenziteto sipanega valovanja v vseh primerih dobro napovedo teoretični modeli po enačbah (23), (24), (25), (26) oziroma (27). Razmerja intenzitete glavnih uklonskih maksimumov glede na centralni vrh so v pravem razmerju s teoretičnimi predvidevanji.

V grafih meritev opazimo šum, ki je posledica sipanja ultrazvoka v okoliškem prostoru. Sorazmerno večja intenziteta šuma je opazna pri večjih kotih. Opazna so tudi manjša odstopanja od teoretičnih napovedi pri širini uklonskih maksimumov in legi sredine stranskih maksimumov, ki so malo premaknjene pri meritvah k manjšim kotom. Povečane so tudi intenzitete sekundarnih maksimumov, v primerjavi z napovedmi teoretičnih modelov, kar bi lahko pripisali dodatnemu sipanju ultrazvoka na delih merilne naprave in na okolici, ki je nismo mogli ustrezno omejiti.

7 ZAKLJUČEK

V naravi se srečujemo z različnimi vrstami valovanja, ki jih lahko razdelimo v dva tipa: transversalno in longitudinalno valovanje. V diplomski nalogi smo obravnavali zvočno valovanje, ki je longitudinalno mehansko valovanje. To valovanje potrebuje snov za širjenje. Pri zvočnem valovanju se prenašajo spremembe tlaka iz delčka na delček v snovi. Zvočno valovanje je sinusno valovanje. V diplomskem delu sem izvedel eksperimente z ultrazvokom. To valovanje je neslišno za naša ušesa. Frekvenca valovanja je višja od našega slišnega spektra.

V diplomski nalogi sem obravnaval uklon in interferenco ultrazvoka na ozkih in širokih režah. Izvedel sem meritve in teoretično obravnaval uklon za eno režo in uklon in interferenco valovanja za dvema, tremi, štirimi, petimi in šestimi režami. S pomočjo kazalčnih diagramov sem izpeljal teoretične izraze za intenziteto ultrazvoka v odvisnosti od uklonskega kota na režah. Dobljene enačbe so podlaga za primerjavo meritev s teoretičnimi predvidevanji. Meritve sem izvedel z goniometrom na avtomatski pogon, ki omogoča avtomatsko zajemanje intenzitete uklonjenega ultrazvoka v odvisnosti od kota širjenja valovanja za režami. Primerjavo meritev s teoretičnimi izračuni sem podal v grafični obliki. Rezultati meritev se dobro ujemajo s teoretičnimi napovedmi.

V prilogi so podana podrobna navodila za pripravo in izvedbo eksperimenta, za študente, ki bodo te meritve izvajali pri eksperimentalnih vajah. Priloga je opremljena s fotografijami za posamezne komponente opreme in njihovo sestavo. Naveden je tudi postopek kalibracije inštrumentov in poskusno merjenje.

8 LITERATURA

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (2004). Fundamentals of Physics, 4. izdaja. New York: John Wiley & Sons.

Krautkramer, J., Krautkramer, H. (1990). Ultrasonic Testing of Materials. UK: Hardcover.

PHYWE, Systeme GmbH & Co. KG, Robert-Bosch-Breite 10, D-37079 Göttingen., Goniometer with reflecting mirror, Goniometer operation unit, Ultrasonic Unit, complete. Tehnična dokumentacija razpoložljive opreme.

Serway, R. A., Jewet, J. W. ml. (2004). Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics. UK: Thomson Learning.

Skoog, D. A., Holler, F. J., Nieman T. A. (1998). Principles of Instrumental analysis. Philadelphia; Sanders Colege Publishing.

Vidic, I. (9. november 2009). Ultrazvok, revija VIVA. Pridobljeno 1. 6. 2012 s svetovnega spleta: <http://www.viva.si/diagnostika/658/ultrazvok>

9 PRILOGA: Navodilo za izvedbo eksperimenta

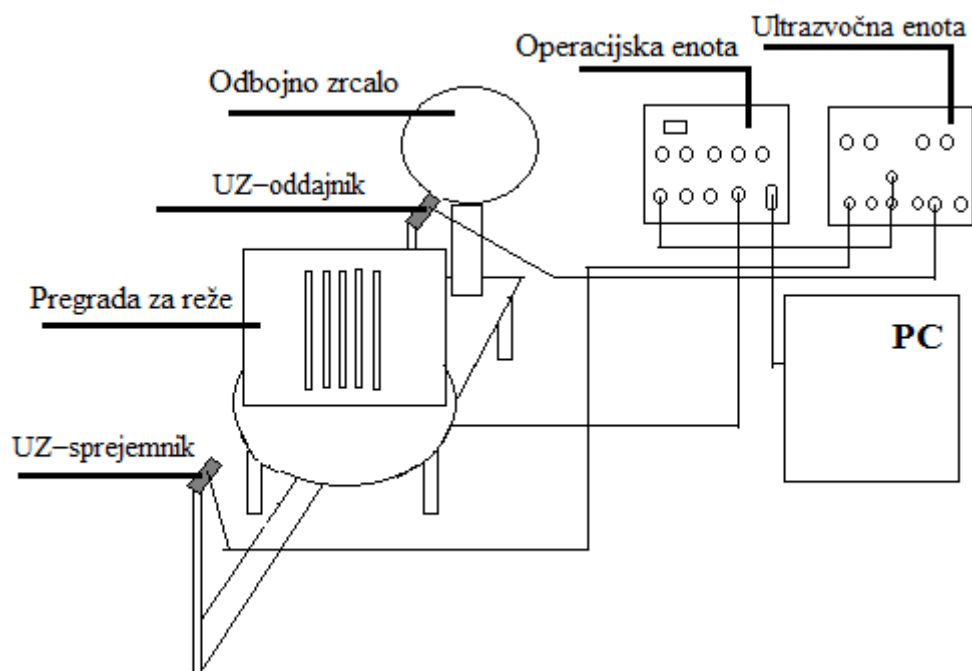
Za izvedbo meritev uklona ultrazvoka na režah je na voljo merilni sistem, ki ga prikazuje slika 46.



Slika 46: Goniometer z odbojnim zrcalom in operacijska enota goniometra.

Glavni sestavni del merilnega sistema je goniometer z odbojnim konkavnim zrcalom, ki ga krmili operacijska enota goniometra. Sistem omogoča avtomatsko snemanje intenzitete ultrazvoka za režami v odvisnosti od kota glede na vpadno smer ultrazvočnega snopa, kot posledica uklona in interference ultrazvočnega valovanja na režah. Merilni sistem omogoča eksperimente, kot so uklon na posamezni reži in interferenca za več režami in na krožnih režah. Merilni sistem je povezan z osebnim računalnikom, ki krmili goniometer in shranjuje podatke, ki jih zajame detektor ultrazvoka med meritvijo. Programska oprema omogoča avtomatsko izvedbo meritev in grafični prikaz izmerjenih vrednosti intenzitete ultrazvoka v odvisnosti od kota.

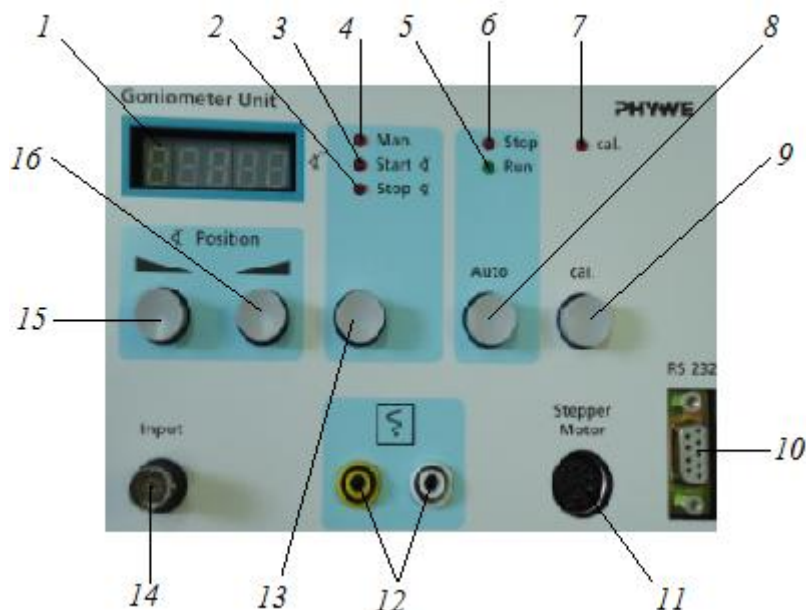
9.1 Namen in značilne lastnosti goniometra



Slika 47: Shema elementov potrebna za meritve.

Konkavno odbojno zrcalo je prek nosilca pritrjeno na podstavek goniometra. Pred zrcalom je premični nosilec za oddajnik, na katerega pritrjemo oddajnik. V središču goniometra stoji miza, s kotno skalo. Pod mizo je montiran kotni motor, na katerega je pritrjena premična roka, s premičnim nosilcem za sprejemnik. V središču mize goniometra je utor za nastavek za okvir rež. Goniometer uporabljamo v kombinaciji z operacijsko enoto, ki je povezana na kotni motor. Operacijska enota je povezana s koaksialnim kablom z ultrazvočno enoto in prek SUB-D vtičnice z osebnim računalnikom. Ultrazvočna enota je povezana z oddajnikom ultrazvoka, ki proizvaja ultrazvočno valovanje in s sprejemnikom ultrazvoka, ki zajema podatke uklona in interference. Opremljena je s potenciometri za nastavljanje intenzitete ultrazvoka iz oddajnika in za nastavitev občutljivosti sprejemnika. Rezultate meritev zajemamo z osebnim računalnikom, za kar potrebujemo programsko opremo Measure 4. ki je nameščena na osebnem računalniku.

9.2 Operacijska enota goniometra

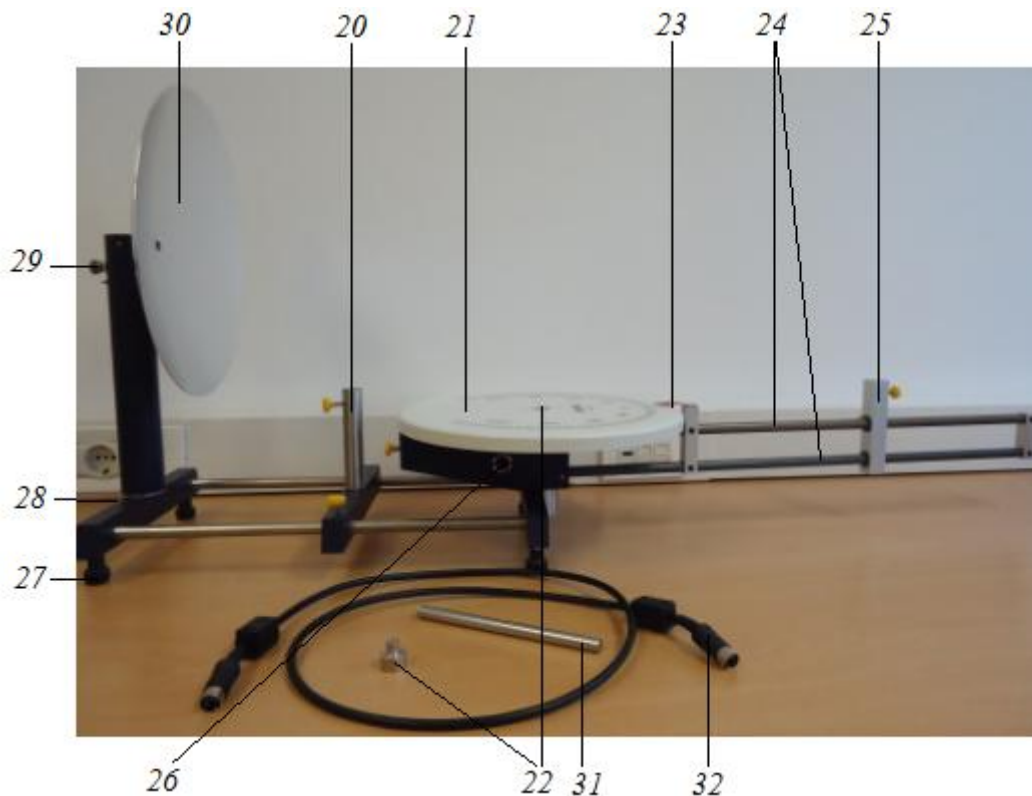


Slika 48: Pogled na čelno ploščo operacijske enote goniometra.

- 1 5-mestni monitor za odčitavanje kota;
- 2 LED »stop« za določanje končnega kota;
- 3 LED »start« za določanje začetnega kota;
- 4 LED »man« za ročno upravljanje enote;
- 5 LED »run«, led lučka gori, ko se merilna roka goniometra premika, (med meritvijo ali pa ko se giblje na začetno mesto ali se vrača s končnega mesta mirjenja);
- 6 LED »stop«, lučka sveti, ko se merilna roka ustavi;
- 7 LED »cal«, označuje, da je operacijska enota vključena v kalibracijskem načinu;
- 8 »Auto« tipka je namenjena zagonu meritve ali prekinitvi merjenja;
- 9 »Cal« tipka za umirjanje merilne roke v kotu 0, pritisnemo dvakrat, na začetku in na koncu kalibracije;
- 10 9-pin SUB-D vtičnica za RS 232 podatkovno povezavo z osebnim računalnikom;
- 11 »Step motor« vtičnica za povezavo s kotnim motorjem na mizi goniometra 13903.99, je napajalni in kontrolni priključek;
- 12 vtičnica za izhodni analogni podatek kota;
- 13 Tipka za izbiranje funkcije: z zaporednim pritiskom na tipko izbiramo operacijsko možnost ročnega upravljanja, izbiro začetnega kota in končnega kota merjenja;
- 14 BNC vtičnica za analogni vhod;

- 15 Tipka za določanje kota, v ročnem načinu uporabimo za določanje kota v negativni smeri in za kalibracijo operacijske enote;
- 16 Tipka za določanje kota, enako kot tipka 15, le v pozitivni smeri.

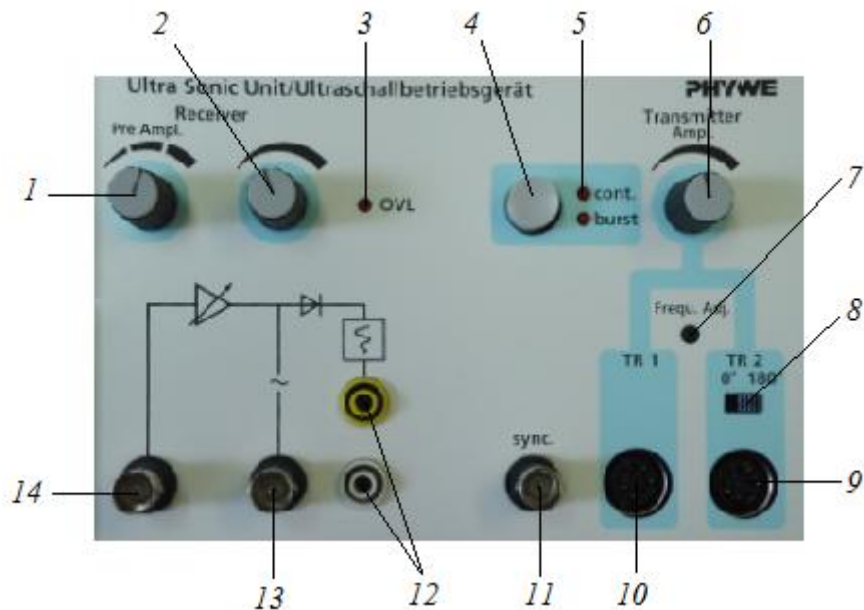
9.3 Goniometer z odbojnim zrcalom



Slika 49: Goniometer z odbojnim zrcalom.

- 20 Premični nosilec oddajnika,
- 21 Miza goniometra,
- 22 Centralni vtič za nosilec rež,
- 23 Označevalec kota,
- 24 Premična roka sprejemnika,
- 25 Premični nosilec sprejemnika,
- 26 Vtičnica kotnega motorja goniometra,
- 27 Nosilne regulacijske noge goniometra,
- 28 Pritrdilni vijak nosilca konkavnega zrcala,
- 29 Vijak za nastavitev kota konkavnega zrcala,
- 30 Konkavno zrcalo,
- 31 Distančnik za nastavitev kota zrcala in višine ter smeri oddajnika,

9.4 Ultrazvočna enota



Slika 50: Ultrazvočna enota.

- 1 Ojačenje ultrazvočnega signala (Pre Ampl) v treh stopnjah;
- 2 Neprekinjena nastavitvev ojačenja ultrazvočnega signala;
- 3 LED dioda (OVL) signalizira prevelik ultrazvočni signal;
- 4 Tipka za nastavitvev načina delovanja, ultrazvočni oddajnik lahko deluje neprekinjeno (cont.) ali v impulzih (bust.);
- 5 LED diode označujejo, kateri način je izbran;
- 6 Gumb za večanje ali manjšanje oddajne amplitude;
- 7 Stikalo za fino nastavljanje oddajnega signala (Freq. Adj.);
- 8 Stikalo za spremembo faznega zamika ultrazvočnega oddajnika 13901.00;
- 9 Vtičnica ultrazvočnega oddajnika 13901.00;
- 10 Vtičnica ultrazvočnega oddajnika 13901.00;
- 11 Izhod za spremljanje oddajnega signala;
- 12 Prečiščen izhod sprejetega signala;
- 13 Izhodna izmenična napetost sprejetega signala;
- 14 Priklop ultrazvočnega sprejemnika 13902.00.

Ultrazvočna enota deluje na frekvenci 40 kHz. Leva stran čelne plošče ultrazvočne enote je sprejemni del, desni del pa je oddajni del. Potrebno je slediti sprejemnim amplitudam, da ne prihaja do premočnega signala. To lahko reguliramo z zmanjševanjem oddajne amplitude in zmanjševanjem ojačenja sprejemnega signala. Valovna dolžina ultrazvočnega valovanja oddajnika je $\lambda \cong 8,6$ mm.



Slika 51: Komplet ultrazvočne enote.

- 40 Ultrazvočni oddajnik,
- 41 Izhodna odprtina ultrazvočnega oddajnika,
- 42 Ultrazvočni sprejemnik,
- 43 Vhodna odprtina ultrazvočnega sprejemnika,
- 44 Ultrazvočna enota,
- 45 Izhod sprejemnega signala,
- 46 Adapter,
- 47 Koaksialen kabel,
- 48 Napajalna enota.

9.5 Navodilo za sestavo in povezavo goniometra

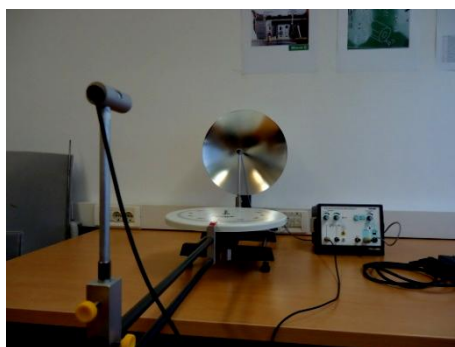
V prejšnjih poglavjih je predstavljena oprema za izvedbo instrumentalne naloge. Opremo je potrebno sestaviti, po naslednjem postopku.



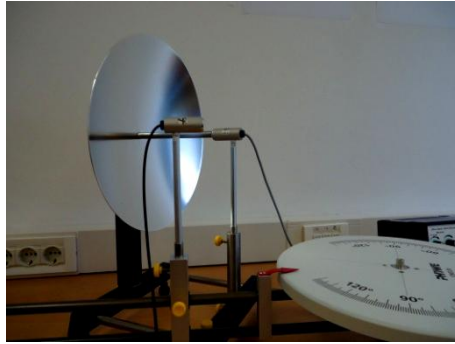
Z vijakom za regulacijo naklona konkavnega zrcala (29) je potrebno namestiti konkavno zrcalo (30), da bo postavljeno čim bolj vertikalno.



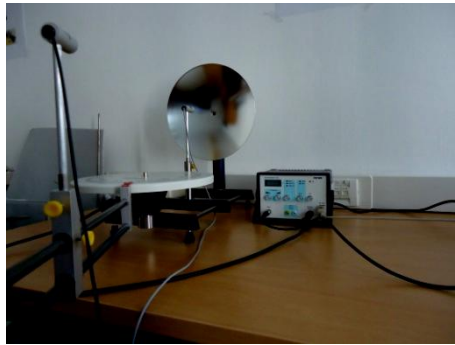
V središče konkavnega zrcala vstavimo distančnik (31). V nosilec oddajnika (20) vstavimo oddajnik (40) tako, da bo odprtina oddajnika (41) obrnjena proti distančniku. Pritrdimo oddajnik, nato vzamemo distančnik iz središča zrcala in pritrdimo na spodnji del nosilca oddajnika na razdaljo distančnika odmaknjeno od središča zrcala. To je 15,5 cm.



Vrtljivo sprejemno roko (24) poravnamo v položaj 0 na mizi goniometra (21). Premični nosilec sprejemnika (25) povlečemo do kraja proč od zrcala. V nosilec vstavimo sprejemnik (42) tako, da je sprejemna odprtina obrnjena (43) proti zrcalu.



Vrtljivo sprejemno roko povlečemo čim bliže zrcalu. Tako lahko sprejemnik postavimo v isto višino, kot je oddajnik. Zopet postavimo sprejemno roko v položaj 0 in sprejemnik poskušamo čim natančneje usmeriti v center konkavnega zrcala. Tako sta oddajnik ultrazvočnega valovanja kot tudi sprejemnik ultrazvočnega valovanja usmerjena v središče zrcala.



Uporabimo kabel (32) in povežemo enoto goniometra s kotnim motorjem (26) na mizi goniometra. Izvedemo še preostale povezave. Uporabimo adapter (46) in koaksialni kabel (47) ter povežemo operacijsko enoto goniometra (14) z ultrazvočno enoto (45). Priklopimo še sprejemnik in oddajnik ultrazvočnega valovanja ter operacijsko enoto goniometra (10) z osebnim računalnikom, na katerem je instalirana programska oprema Measure 4.



Zgornja slika prikazuje povezavo goniometra z odbojnim zrcalom, operacijsko enoto goniometra, ultrazvočno enoto in kabel za povezavo z osebnim računalnikom.

9.6 Kotna kalibracija operacijske enote goniometra

Kotno kalibracijo z električno energijo je potrebno izvesti in prilagoditi s kotno lestvico na mizi goniometra. To je običajno potrebno le, če je instrument prvič uporabljen, ali pa ga zopet uporabimo po dolgem času. Poskrbimo, da je goniometer stabilno poravnana na stojnih nogah. Postopek za prilagoditev kota je sledeč:

- A) Preverimo, če je kabel (32) za povezavo povezan z operacijsko enoto goniometra.
- B) Operacijsko enoto goniometra izklopimo na hrbtnišču.
- C) Zopet vklopimo stikalo, obenem pritiskamo tipko »Cal« (9). Sedaj smo v prilagoditvenem načinu in zaslon instrumenta (1) izpiše »C -70«.
- D) Uporabimo tipke za naprej in nazaj (15) in (16), za premik premične sprejemne roke na pozicijo -70° .
- E) Pritisnemo tipko (13) in tedaj instrumentov zaslon prikaže izpis »C 70«.
- F) Uporabimo zopet tipke za naprej in nazaj (15) in (16), dokler premična sprejemna roka ne doseže kota 70° .
- G) Pritisnemo tipko (13) in instrumentov zaslon izpiše »070.0«. Sedaj smo zapustili postopek prilagoditve in se nahajamo v ročnem načinu.

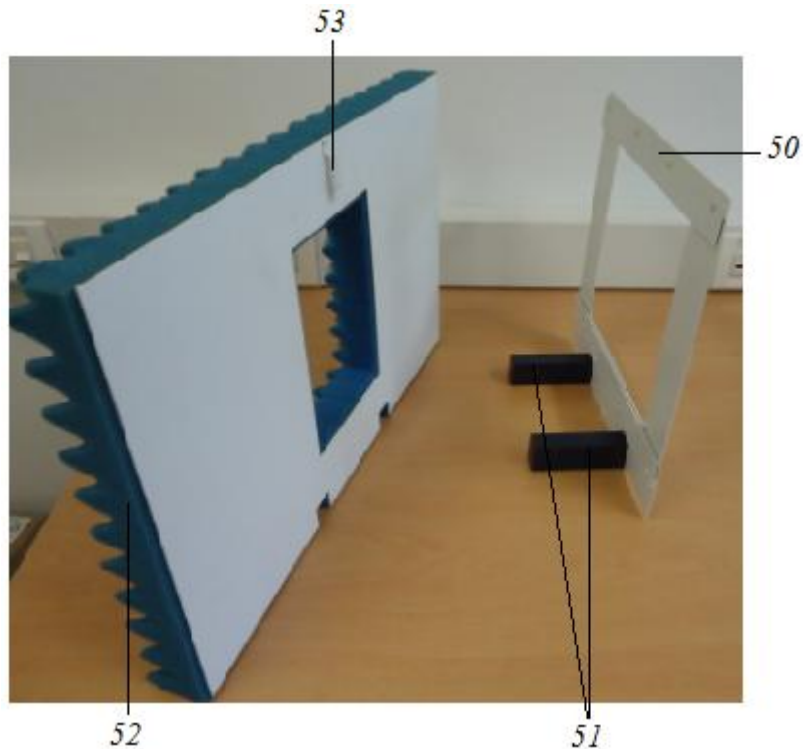
Sedaj potrebujemo še natančno določitev položaja 0 roke sprejemnika in kotnega motorja:

- A) Pritisnemo tipko »Cal« (9). Sprejemna premična roka je sedaj prosto premikajoča in zaslon instrumenta (1) je temen. Posvetila je signalna dioda »Cal« (7).
- B) Premaknemo sprejemno premično roko v položaj 0° .
- C) Zopet pritismo tipko »Cal« (9). Sprejemna premična roka ni več prosto premikajoča in na zaslonu je izpisano »000.0«. Zopet smo prešli iz kalibracijskega načina v ročnega. Operacijska enota goniometra je umirjena in instrument je pripravljen za izvedbo meritev.

9.7 Pregrada in okvir rež

Najprej vstavimo centralni vtič za nosilec rež (22). Potisnemo vijake na nogah okvirja rež (51) za dobro stabilnost. Okvir rež (50) vstavimo v vtič na mizi goniometra tako, da so noge

okvirja usmerjene proti konkavnemu zrcalu. Okvir rež poravnamo, da je v liniji z 90° na mizi goniometra. V okvir vstavimo režo, tako da je odprtina reže simetrična glede na linijo 0° na mizi goniometra. Sedaj lahko natakemo protizvočno pregrado (52) tako, da je spužvasti del obrnjen proti konkavnemu zrcalu, in je pritrdilni jeziček pregrade (53) na vrhu okvirja rež.



Slika 52: Okvir rež in protizvočna pregrada.

- 50 Okvir rež,
- 51 Noge okvirja rež,
- 52 Protizvočna pregrada,
- 53 Pritrdilni jeziček pregrade.

9.8 Priprava eksperimenta za preizkus delovanja

Za preizkusni eksperiment izvedemo uklon ultrazvočnega valovanja za eno režo. Širina reže $a = 6 \text{ cm} = 0.06 \text{ m}$, $\lambda = 8,6 \text{ mm} = 0,0086 \text{ m}$. Režo moramo postaviti simetrično na os 0° , se pravi, da se mora začeti pri -3 cm in končati pri $+3 \text{ cm}$ na milimetrskem traku na okvirju rež. Najprej preklopimo operacijsko enoto goniometra na ročen način. Sprejemno premično roko postavimo v položaj 0° . Na ultrazvočni enoti na vtičnicah (12) s pomočjo voltmetra in gumbov (1), (2) in (6), nastavimo sprejemno napetost na maksimalno vrednost $3,5 \text{ V}$, da ne bi

med merjenjem prihajalo do premočnega sprejema. Na osebni računalnik zažene program Measuring 4. V zgornjem levem kotu kliknemo na polje z rdečo piko. Odpre se nam aplikacija, v kateri moramo določiti kot območja merjenja uklona. Izberemo kot od -45° do $+45^\circ$. Ko to potrdimo, se nam odpre merilna stran. V okencu se izpišejo dve možnosti: »Stop meritev« ali »Pojdi na začetni položaj«. Izberemo drugo možnost, merilna roka pa že potuje na začetno pozicijo -45° . Ko prispe, nam ponudi aplikacijo »Start meritev«. Po potrditvi steče merjenje. Na zaslonu lahko spremljamo graf merjenih količin, spreminjanje kota, merjena napetost v digitalni in analogni obliki. Measuring 4 program lahko izvede do 16 različnih merenj v enem aplikacijskem sklopu.

Če analiziramo dobljen graf vidimo, da je prvi minimum levo in desno v kotu $8,2^\circ$.

Ta rezultat lahko potrdimo tudi s teoretično z enačbo:

$$\sin\theta_{\min} = n \frac{\lambda}{a}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad \lambda = 0.0086 \text{ m}, a = 0,06 \text{ m}, n = 1,$$

in tako dobimo, da je $\theta_{\min} = 8,24^\circ$.

Sedaj sta goniometer in oprema pripravljena za izvajanje meritev.

9.9 Spisek uporabljenih naprav in materialov

- 1 Goniometer z odbojnim zrcalom (13903.00),
- 2 Operacijska enota goniometra (13903.99),
- 3 Ultrazvočna enota (13900.00),
- 4 Napajalnik za ultrazvočno enoto, 5 VDC, 12 W (13900.99),
- 5 Ultrazvočni oddajnik (13901.00),
- 6 Ultrazvočni sprejemnik (13902.00),
- 7 Okvir rež (13904.00),
- 8 Uklonske reže (13905),
- 9 9-pin SUB-D vtičnica za RS 232 podatkovno povezavo s PC-jem (14602.00),
- 10 Metrski trak (09936.00),
- 11 Kontrolna in napajalna žica kotnega motorja goniometra BNC (07542.11),
- 12 Koaksialni kabel (07542.00),
- 13 Adapter za koaksialni kabel (07542.27),
- 14 Phywe measure 4 programska oprema (14523.61),

15 Digitalni multimeter (07128.00).